

Βαρυτικά Κύματα

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥΛΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



Θεσσαλονίκη, 6/4/2014

Νευτώνεια βαρύτητα

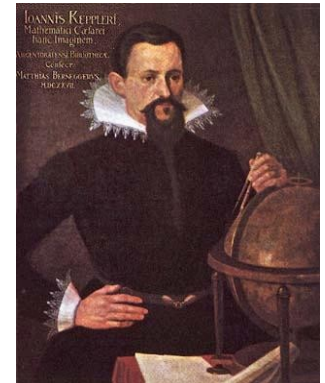
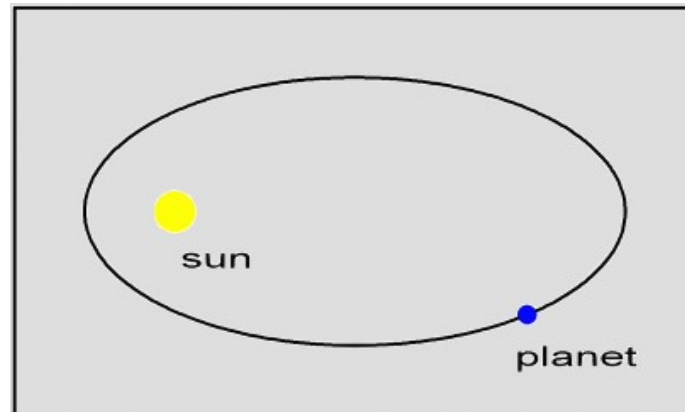
1687: Ο Νεύτωνας θεωρούσε ότι η βαρύτητα δρα ακαριαία σε οποδήποτε μεγάλες αποστάσεις.

$$F = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

(το βαρυτικό δυναμικό Φ δίνεται από μια ελλειπτική εξίσωση)

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G\rho$$

Έτσι εξήγησε τους νόμους των πλανητικών τροχιών που είχε βρει εμπειρικά ο Κέπλερ (1609)

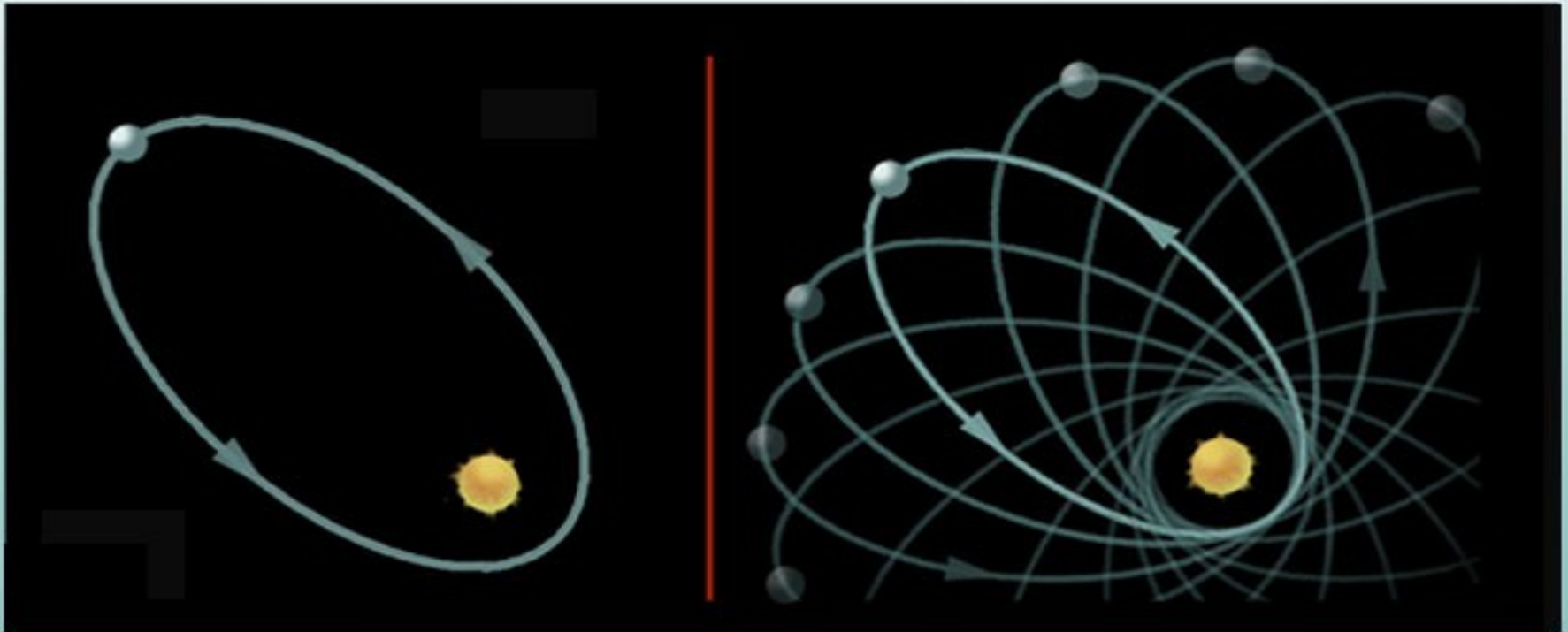


Προβλήματα της Νευτώνειας βαρύτητας

1859: **Le Verrier**: Το περιήλιο της ελλειπτικής τροχιάς του Ερμή μετατίθεται κατά ένα ανεξήγητο $38''$ /αιώνα!

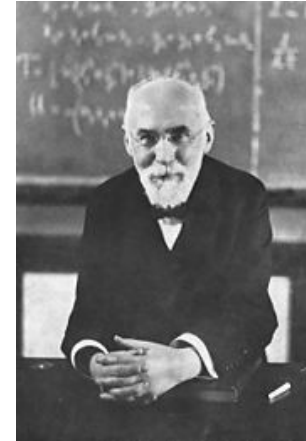


MERCURY'S ORBIT



Προβλήματα της Νευτώνειας βαρύτητα

1900: ο Lorentz προτείνει ότι η δύναμη της βαρύτητας δε μεταδίδεται ακαριαία (όπως προβλέπει η Νευτώνεια θεωρία) αλλά με την ταχύτητα του φωτός.

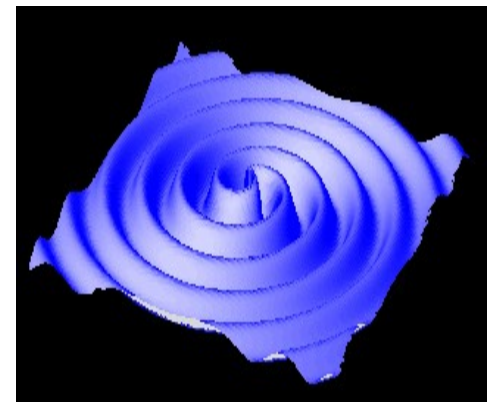


1905: ο Poincaré προτείνει την ύπαρξη βαρυτικών κυμάτων.



Έπρεπε να βρεθεί μια νέα θεωρία για τη βαρύτητα, η οποία να περιγράφεται από κυματικές εξισώσεις (υπερβολικού τύπου).

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \nabla^2 \Phi = 4\pi G\rho$$



Γενική Θεωρία Σχετικότητας (ΓΘΣ)

Η ΓΘΣ ενσωματώνει τη Βαρύτητα στον 4-διάστατο χωρόχρονο της ΕΘΣ, όπου οι φυσικές αποστάσεις μετρώνται με τη βοήθεια ενός μετρικού τανυστή.

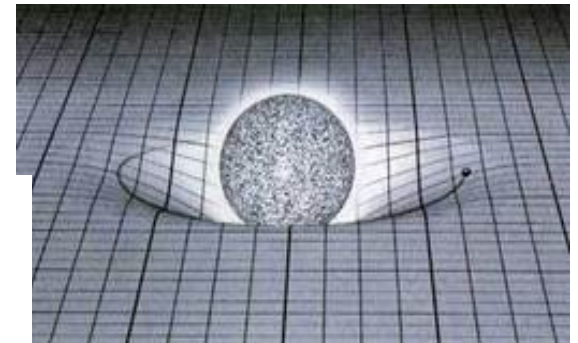
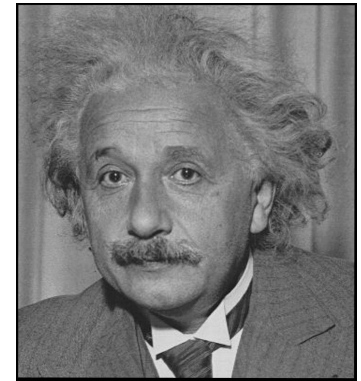
Η βαρύτητα εκδηλώνεται ως καμπύλωση του χωροχρόνου, που προκαλείται από κάθε μορφής ενέργεια.

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = \frac{1}{2} g^{\lambda\rho} \left(\frac{\partial g_{\rho\nu}}{\partial x^{\mu}} + \frac{\partial g_{\rho\mu}}{\partial x^{\nu}} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{\rho}} \right)$$

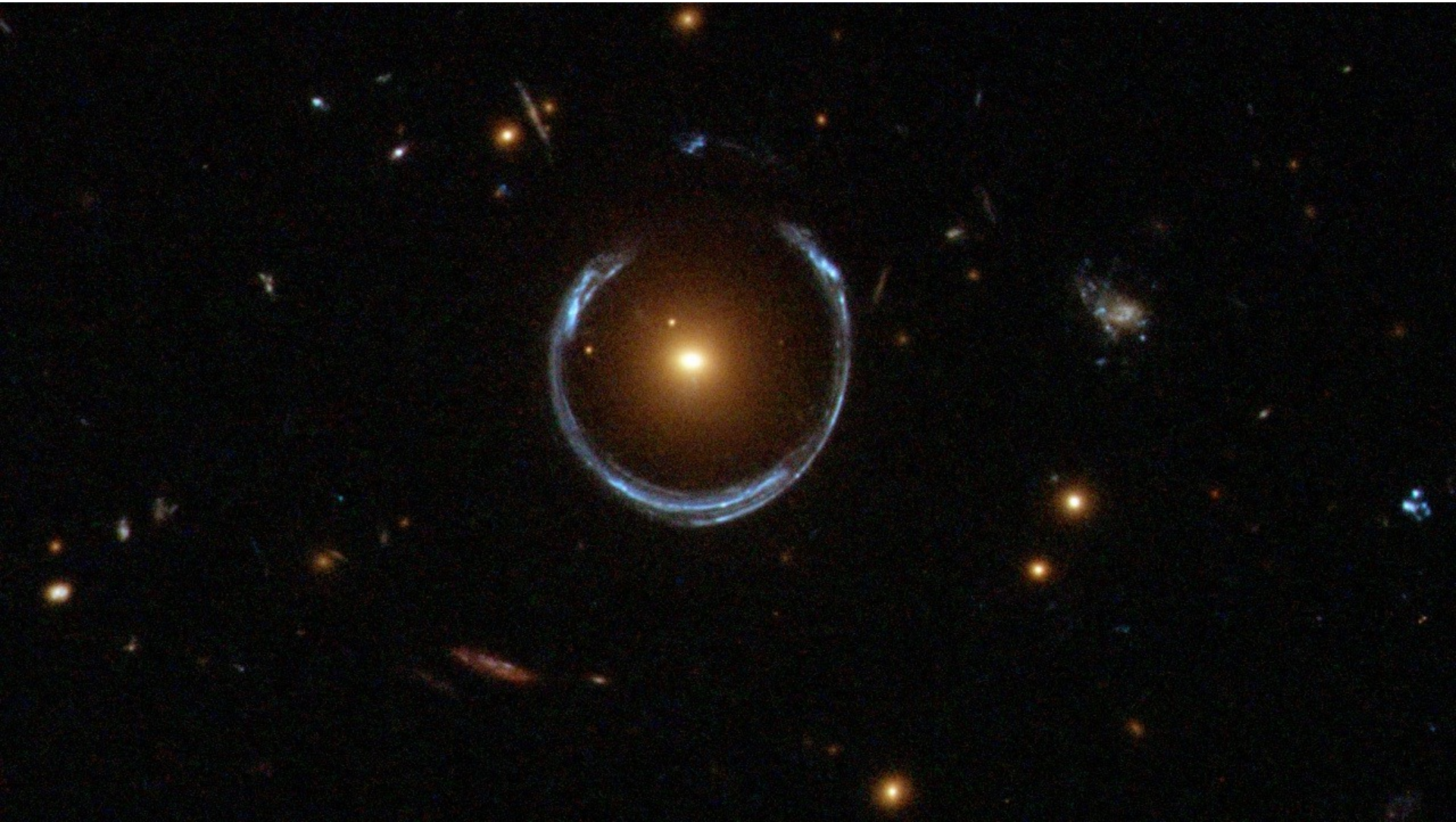
$$R_{\sigma\mu\nu}^{\rho} = \partial_{\mu} \Gamma_{\sigma\nu}^{\rho} - \partial_{\nu} \Gamma_{\sigma\mu}^{\rho} + \Gamma_{\mu\lambda}^{\rho} \Gamma_{\sigma\nu}^{\lambda} - \Gamma_{\nu\lambda}^{\rho} \Gamma_{\sigma\mu}^{\lambda}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Οι εξισώσεις πεδίου ισχύουν σε οποιοδήποτε σύστημα συντεταγμένων (είναι συναλλοίωτες).



"Δαχτυλίδι του Einstein" LRG 3-757



Ελάττωση της (κλασικής) ενέργειας φωτονίων

Η κλασική ενέργεια $E = h\nu$ ενός φωτονίου ελαττώνεται, όταν αυτό εξέρχεται από ένα βαρυτικό πεδίο.

Ένα φωτόνιο που εκπέμπεται με ενέργεια E_0 σε κάποια απόσταση r από μια πηγή βαρύτητας, θα φτάσει σε μεγάλη απόσταση με μικρότερη ενέργεια

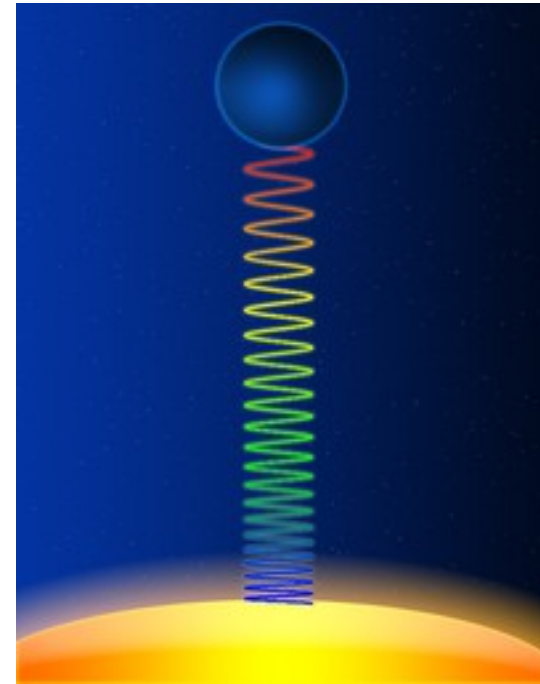
$$E = \left(1 - \frac{R_s}{r}\right)^{1/2} E_0$$

όπου R_s είναι η ακτίνα Schwarzschild.

Ένα οποιοδήποτε σώμα με μάζα M , αρκεί να συρρικνωθεί αρκετά, ώστε η ακτίνα του να γίνει ακτίνα Schwarzschild.

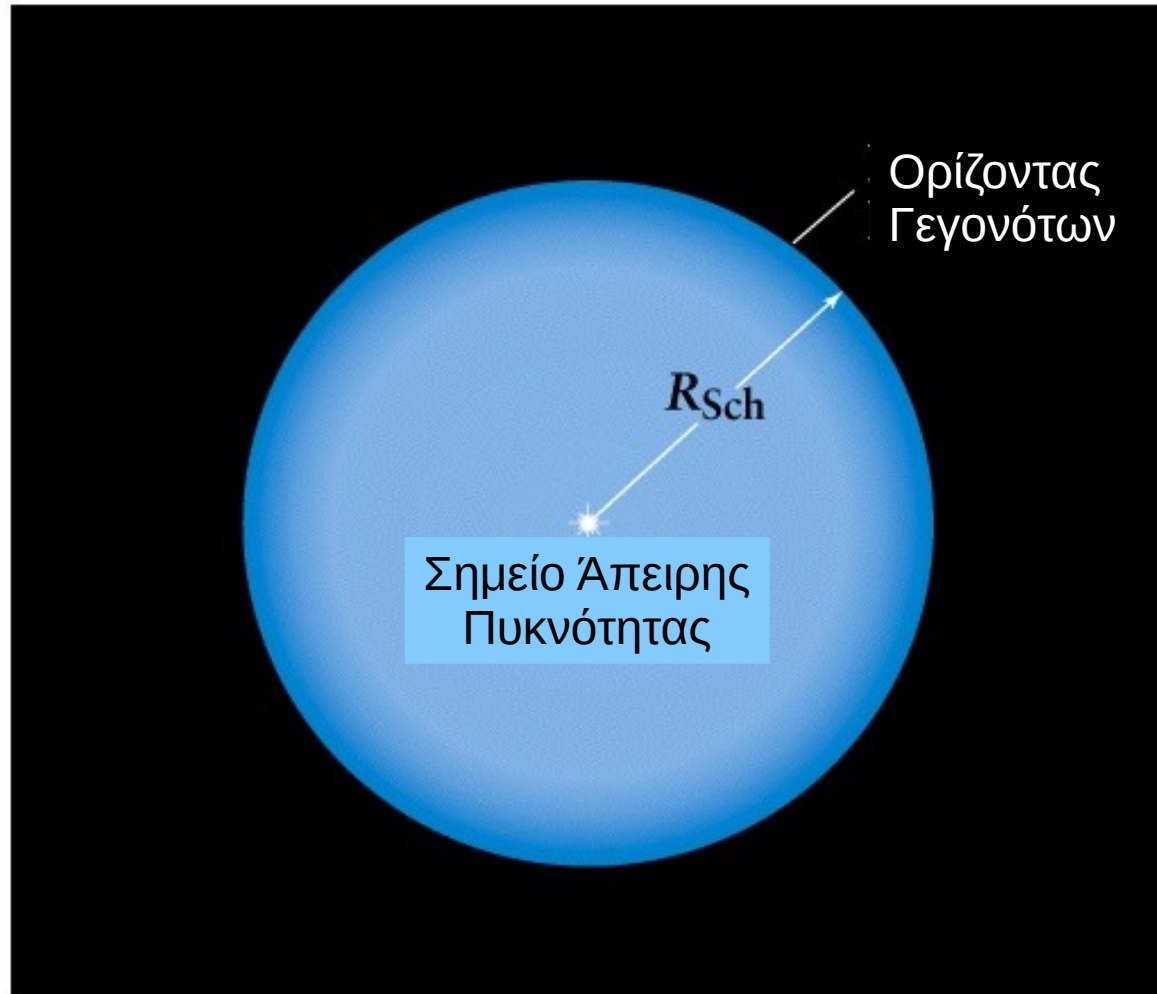
Ήλιος: $R_s = 3\text{km}$

Γη: $R_s = 9\text{mm}$



Η μελανή οπή στην κλασική ΓΘΣ

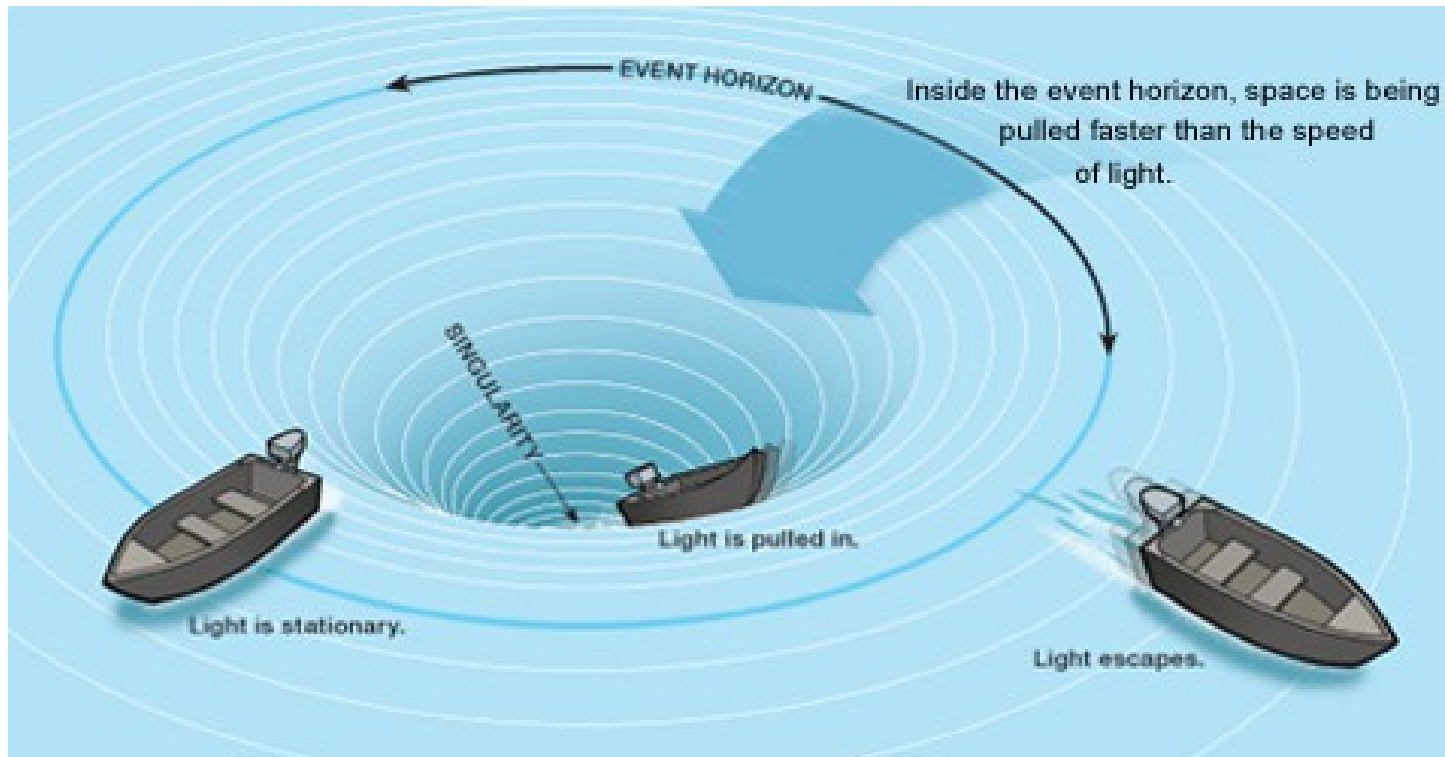
Καμιά πληροφορία δεν μπορεί να εξέλθει από την ακτίνα Schwarzschild, κι έτσι αυτή αποτελεί έναν **ορίζοντα γεγονότων**.



ΓΘΣ και μετρικός τανυστής

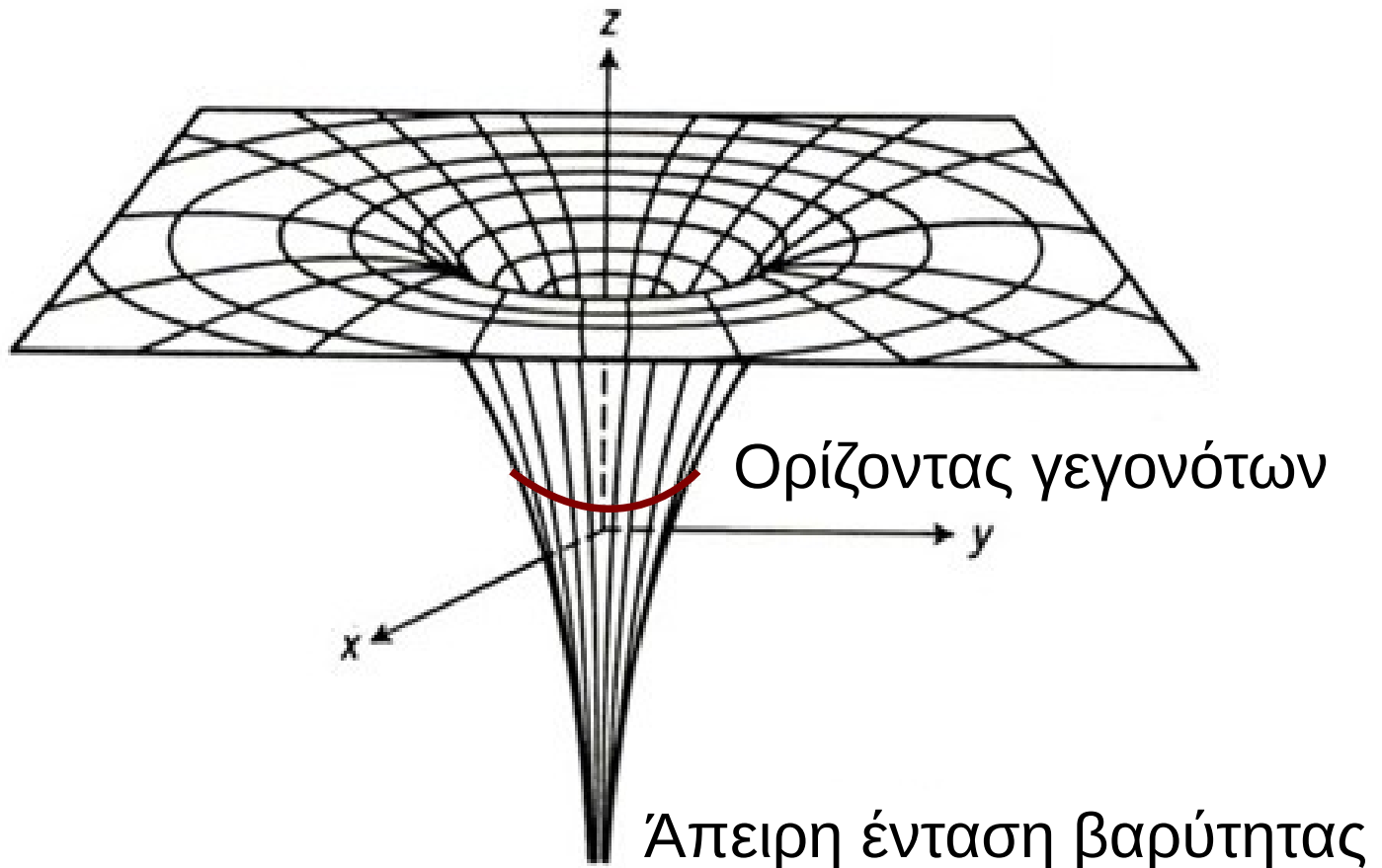
1915: Ο Einstein θεμελιώνει τη Γενική Θεωρία Σχετικότητας

Η καμπύλωση του χωροχρόνου σε 3+1 διαστάσεις περιγράφεται από έναν **μετρικό τανυστή** g_{ij} .



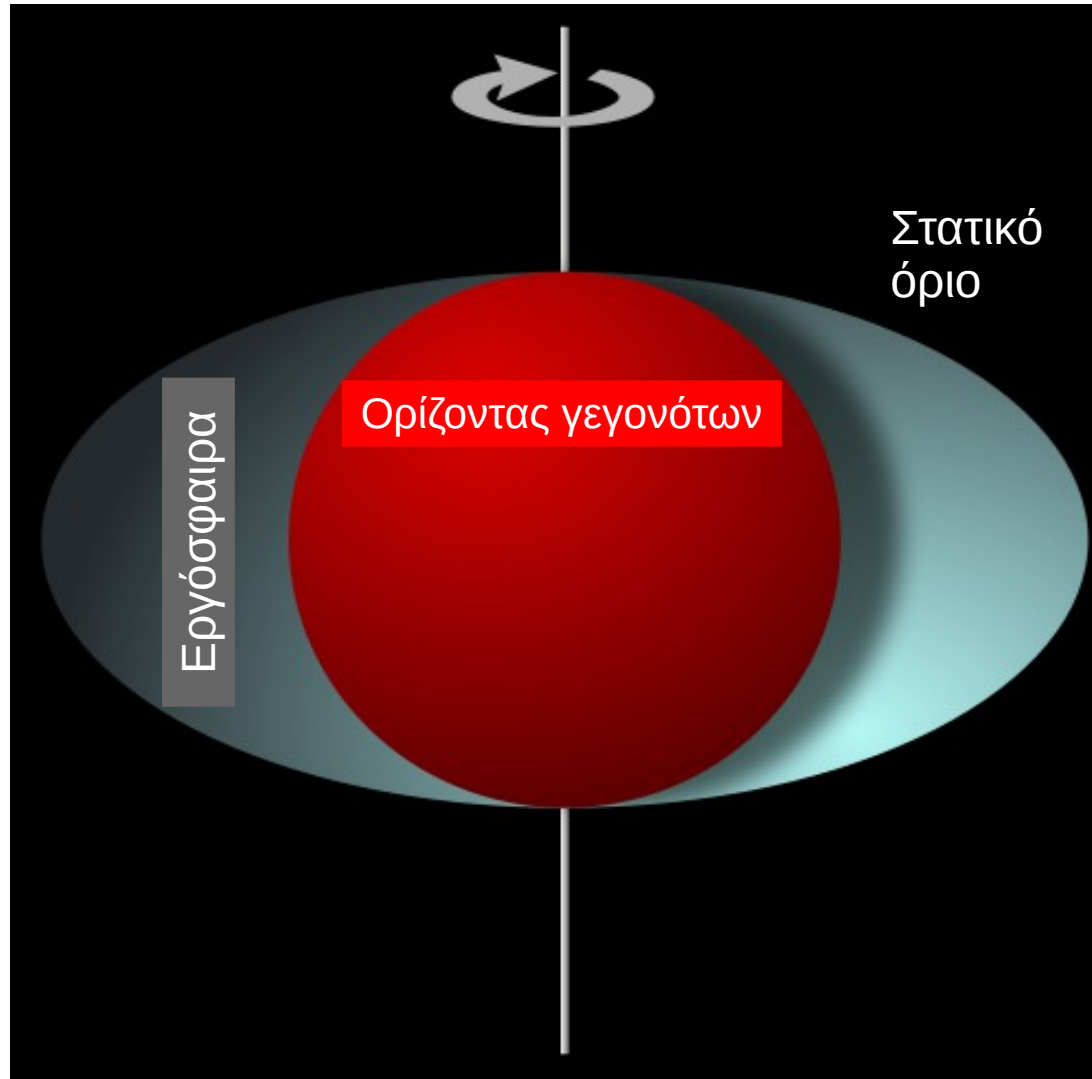
Η καμπύλωση του χωροχρόνου

Όσο πιο έντονη η βαρύτητα, τόσο πιο έντονη η καμπύλωση του χωροχρόνου.



Περιστρεφόμενη μελανή οπή

Η λύση της ΓΘΣ για περιστρεφόμενες μελανές οπές ανακαλύφθηκε από τον Kerr.



Βαρυτικά Κύματα

Μακριά από ένα αστέρα που ταλαντώνεται, ο μετρικός τανυστής είναι μια μικρή διαταραχή του (επίπεδου) μετρικού τανυστή Minkowski της ΕΘΣ. Σε αυτή την προσέγγιση, προκύπτει πράγματι μια κυματική εξίσωση.

$$G^{\alpha\beta} \equiv R^{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} R = 8\pi T^{\alpha\beta}$$

μετρική ενέργεια-ορμή

$$g^{\alpha\beta} = \eta^{\alpha\beta} + h^{\alpha\beta}$$

$$\left(-\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2 \right) \bar{h}^{\alpha\beta} = -16\pi T^{\alpha\beta}$$

ΣΤΟ ΚΕΝΟ: $T^{\alpha\beta} = 0$

Διαφορές Βαρυτικών/Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

Τα βαρυτικά κύματα έχουν αρκετές διαφορές σε σχέση με τα ηλεκτρομαγνητικά. Οι κυριότερες ιδιότητες είναι:

Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα

Τουλάχιστον διπολικά

Δημιουργούνται από +/- φορτία

Ισχυρή αλληλεπίδραση με την ύλη

Γραμμική/κυκλική πόλωση

Μπορεί να έχουν μήκος κύματος μικρότερο από τις διαστάσεις της πηγής

Βαρυτικά Κύματα

Τουλάχιστον τετραπολικά

Δημιουργούνται από + μάζες

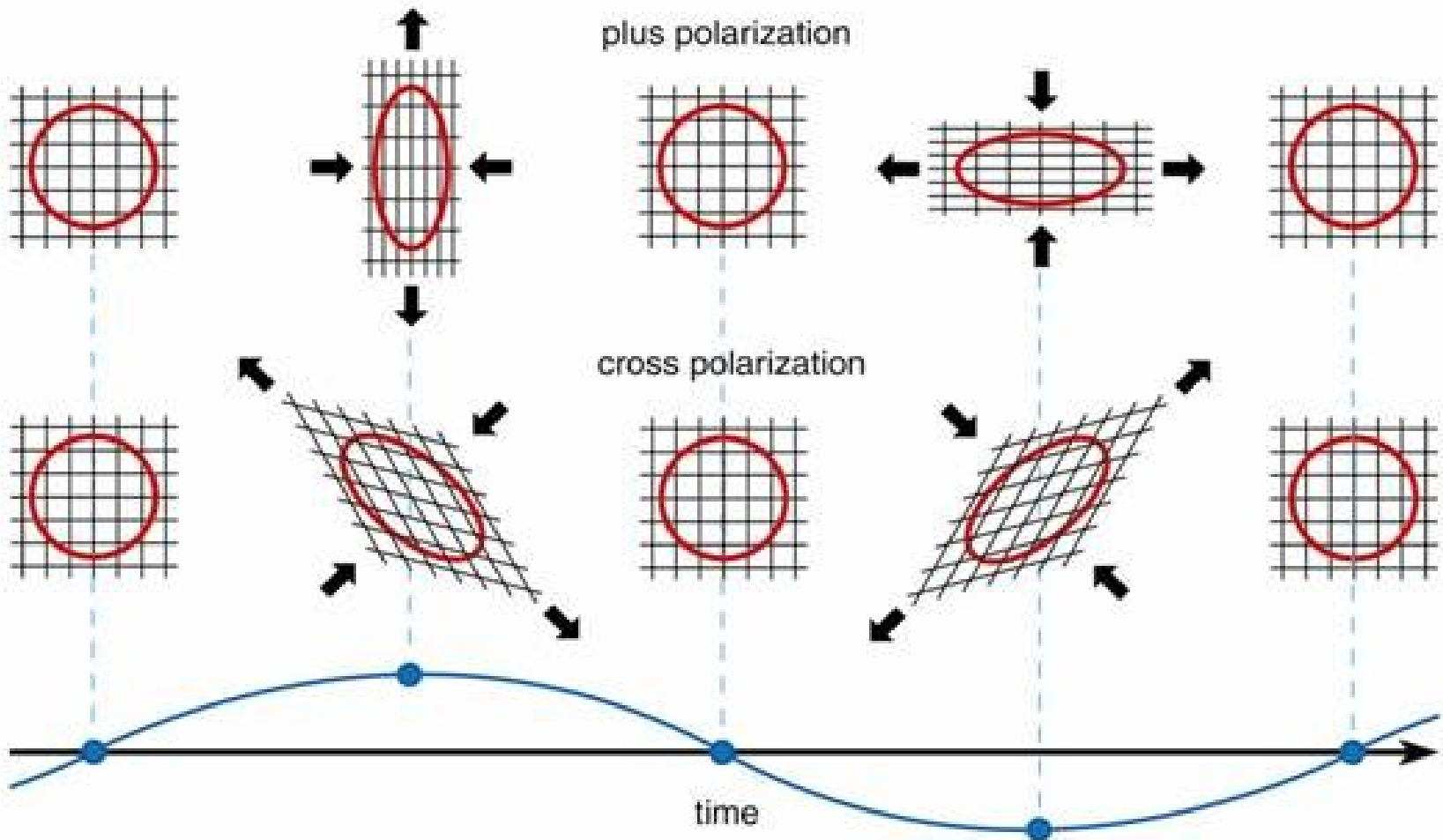
Ασθενής αλληλεπίδραση με την ύλη

Πόλωση + / χ

Έχουν μήκος κύματος πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της πηγής

Πόλωση των Βαρυτικών Κυμάτων

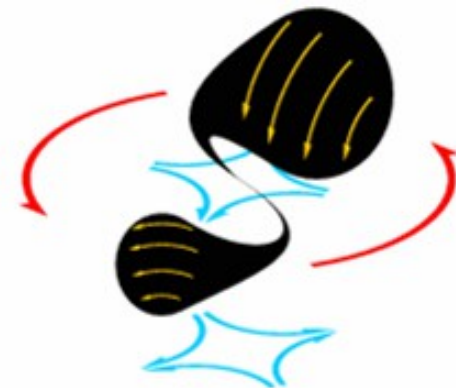
Τα βαρυτικά κύματα είναι εγκάρσια και έχουν δύο ειδών πολώσεις:



Πλάτος Βαρυτικών Κυμάτων

Η πηγή των βαρυτικών κυμάτων είναι μη-αξονικά συμμετρικές χρονικές μεταβολές (τουλάχιστον τετραπολικές).

Εάν υποθέσουμε περιοδική μεταβολή, με κάποια συχνότητα Ω , βρίσκουμε:



$$I^{lm} \equiv \int \rho x^l x^m d^3 x$$

πυκνότητα μάζας

$$\bar{h}_{jk} = -2 \ddot{I}_{jk} / r = -2 \Omega^2 I_{jk} e^{i\Omega r} / r$$

ελάττωση
πλάτους ως
 $1/r$

τετραγωνική
εξάρτηση από
τη συχνότητα

Παράδειγμα: Ταλάντωση Αστέρα Νετρονίων

Ακτίνα: $R=10$ km

Συχνότητα: $f = 2$ kHz

Απόσταση: $r = 20$ Mpc

Ροή ενέργειας βαρυτικών κυμάτων στη Γη:

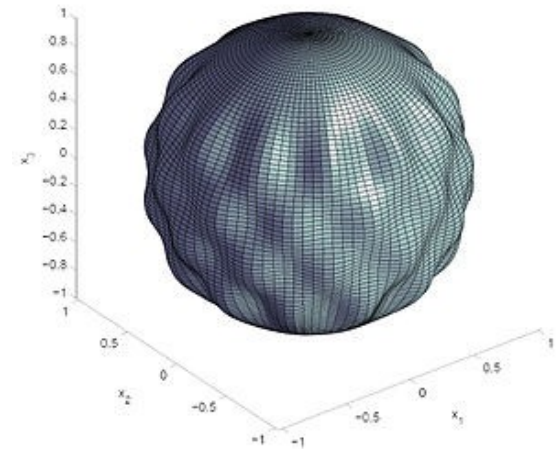
$$F = 0.6 \text{ W/m}^2/\text{s} > F(\text{H/M της Σελήνης}) !$$

Παρόλα αυτά, λόγω της πολύ ασθενούς αλληλεπίδρασης των βαρυτικών κυμάτων με την ύλη, προκαλείται μια διαφορά μήκους μόλις

$$\Delta L \sim 1\% \text{ της ακτίνας ενός πρωτονίου (!)}$$

σε έναν ανιχνευτή μήκους $L = 4$ km. Δηλαδή, το σχετικό πλάτος είναι (στην καλύτερη περίπτωση) της τάξης μεγέθους:

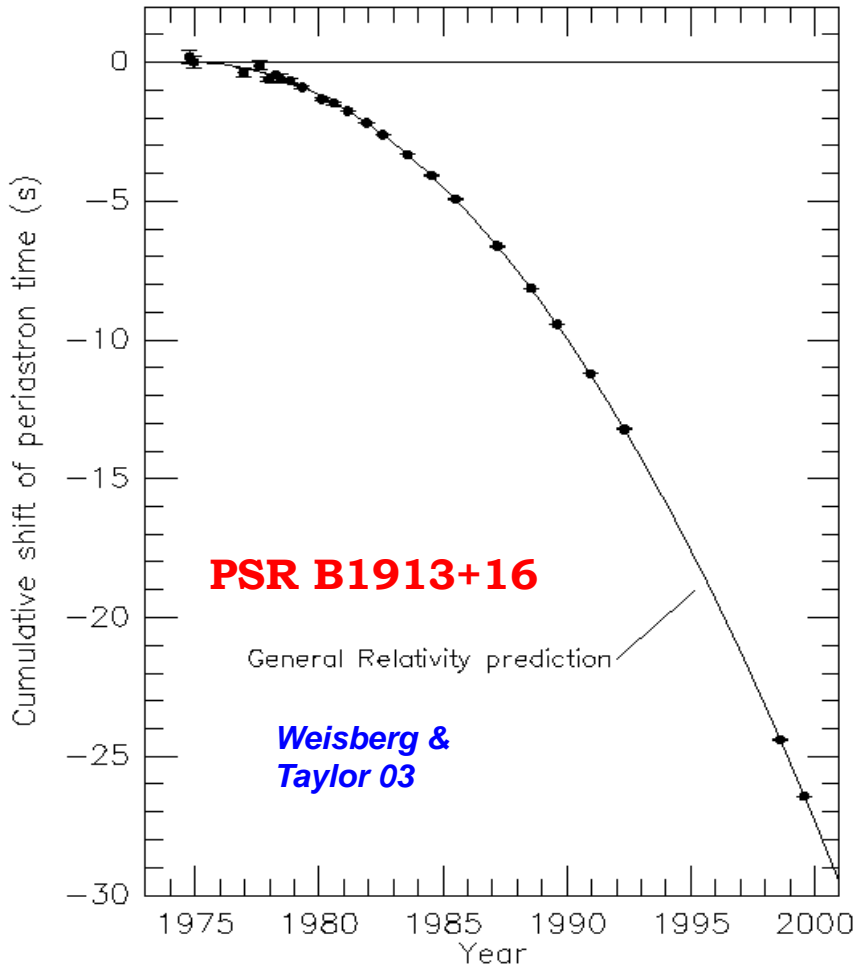
$$h \sim \Delta L/L \sim 10^{-21}$$



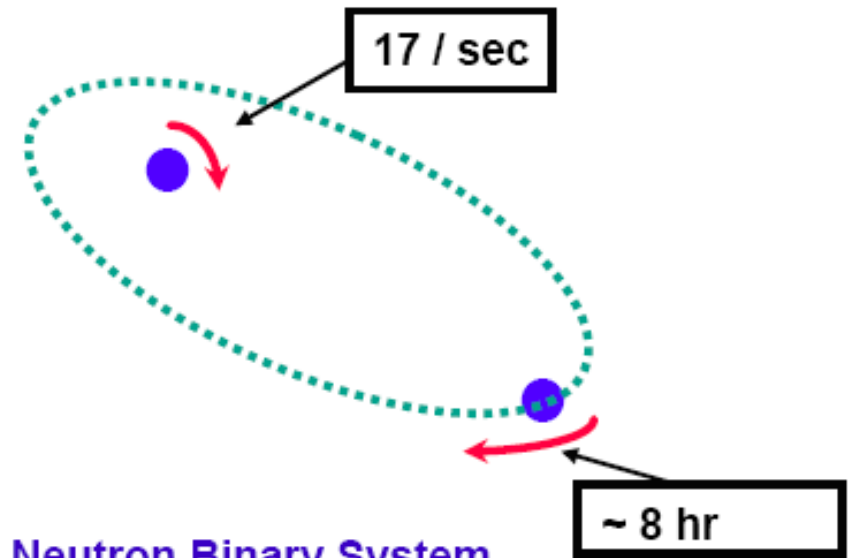
Διπλά Συστήματα Αστέρων Νετρονίων

(Nobel Prize, 1993)

Η πρώτη έμμεση επιβεβαίωση της ύπαρξης των βαρυτικών κυμάτων!



PSR 1913 + 16 -- Timing of pulsars



Neutron Binary System

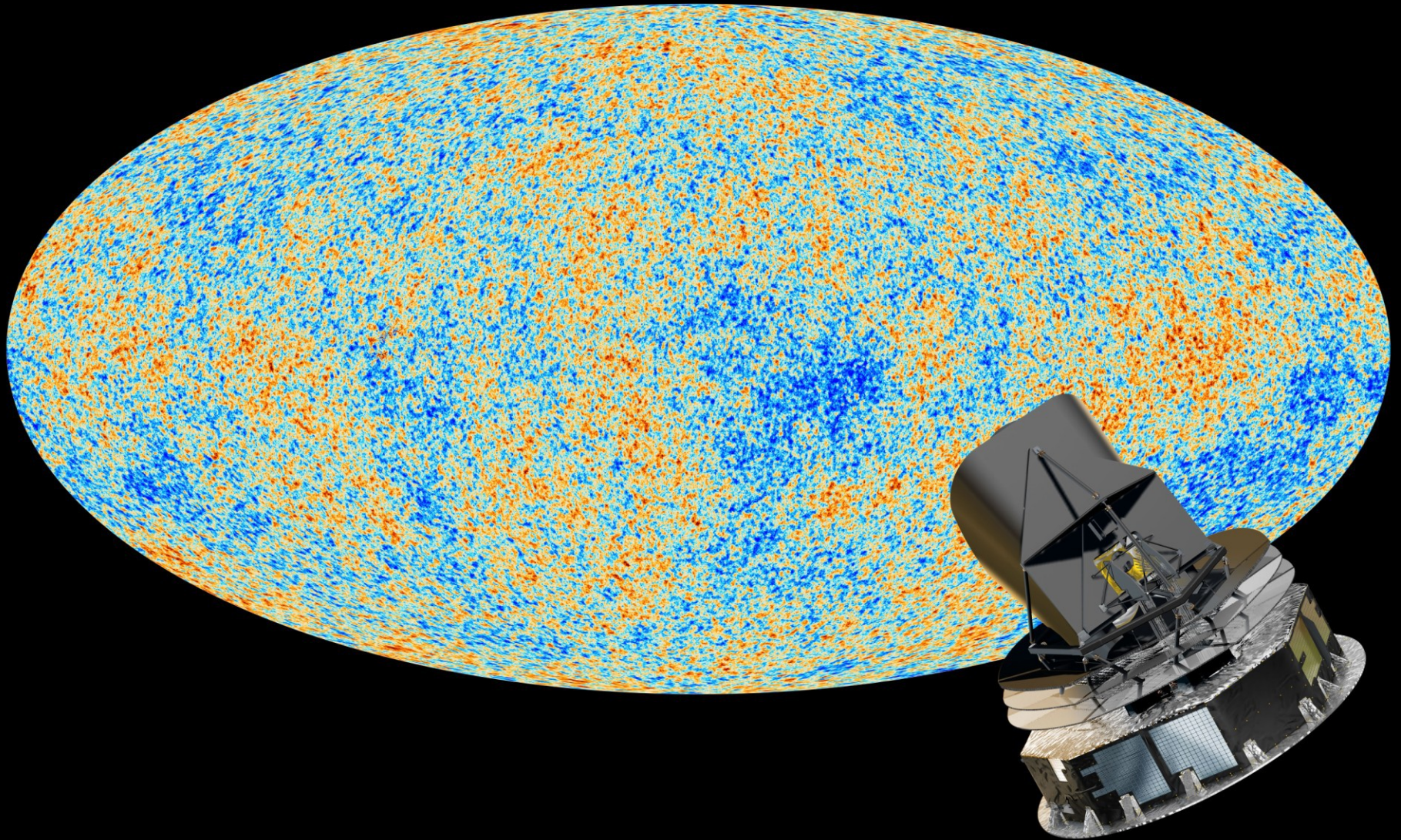
- separated by 10^6 miles
- $m_1 = 1.44m_{\odot}$; $m_2 = 1.39m_{\odot}$; $\varepsilon = 0.617$

Prediction from general relativity

- spiral in by 3 mm/orbit
- rate of change orbital period

Κοσμική Ακτινοβολία Υποβάθρου

Θερμοκρασία: 2.7 Κ. Διαταραχές: <math>< 10 \mu\text{K}</math>. (αποστολή Planck της ESA)



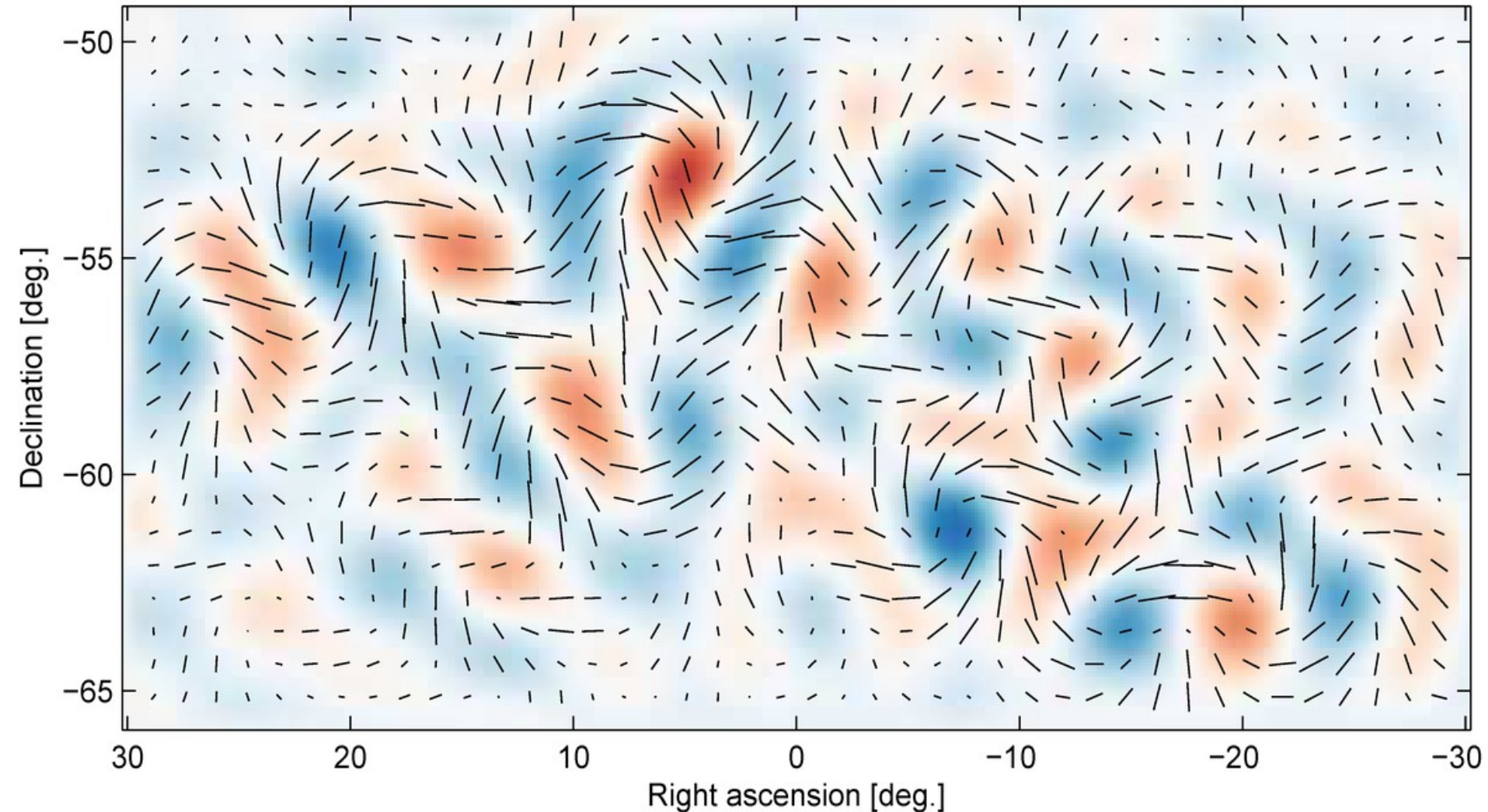
Πείραμα ΒΙΣΕΡ-2



Αποτύπωμα Βαρυτικών Κυμάτων

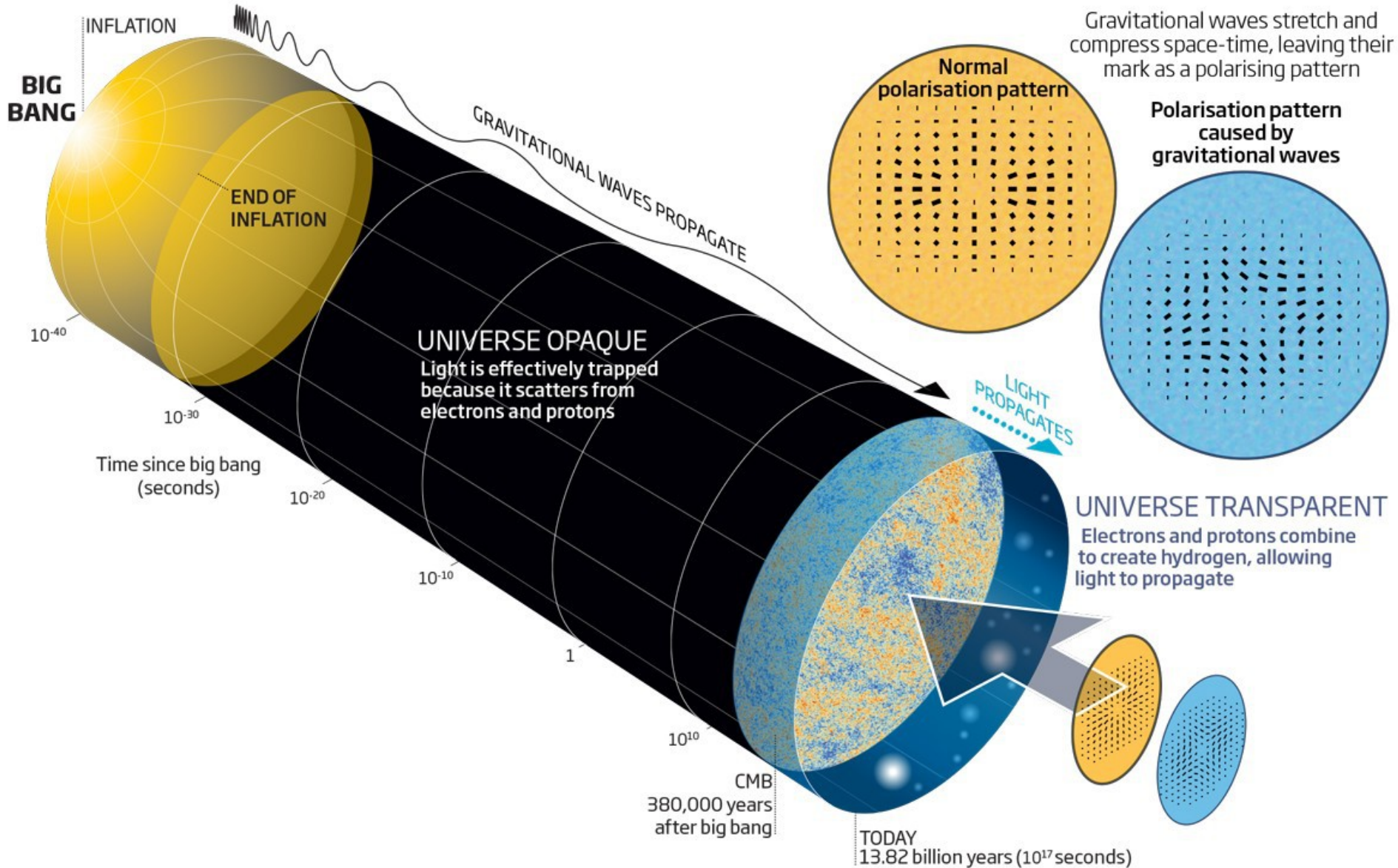
Η διέλευση βαρυτικών κυμάτων αφήνει ένα χαρακτηριστικό αποτύπωμα.

BICEP2 B-mode signal



Το 'Κανονικό' Κοσμολογικό Μοντέλο

Το απλούστερο μοντέλο προβλέπει την ύπαρξη μιας αρχικής φάσης πληθωριστικής επέκτασης του Σύμπαντος.



LASER INTERFEROMETER GW DETECTORS

LIGO - WA



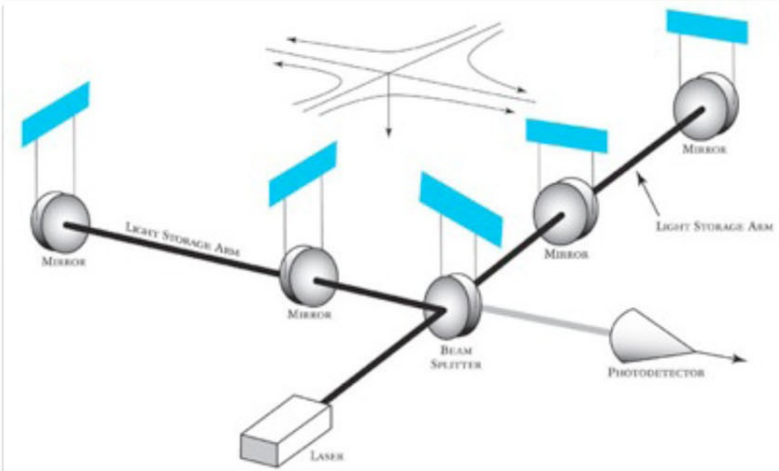
LIGO - LA



GEO600



Virgo (IT)



Παγκόσμιο Δίκτυο Συμβολόμετρων Ακτίνων Laser

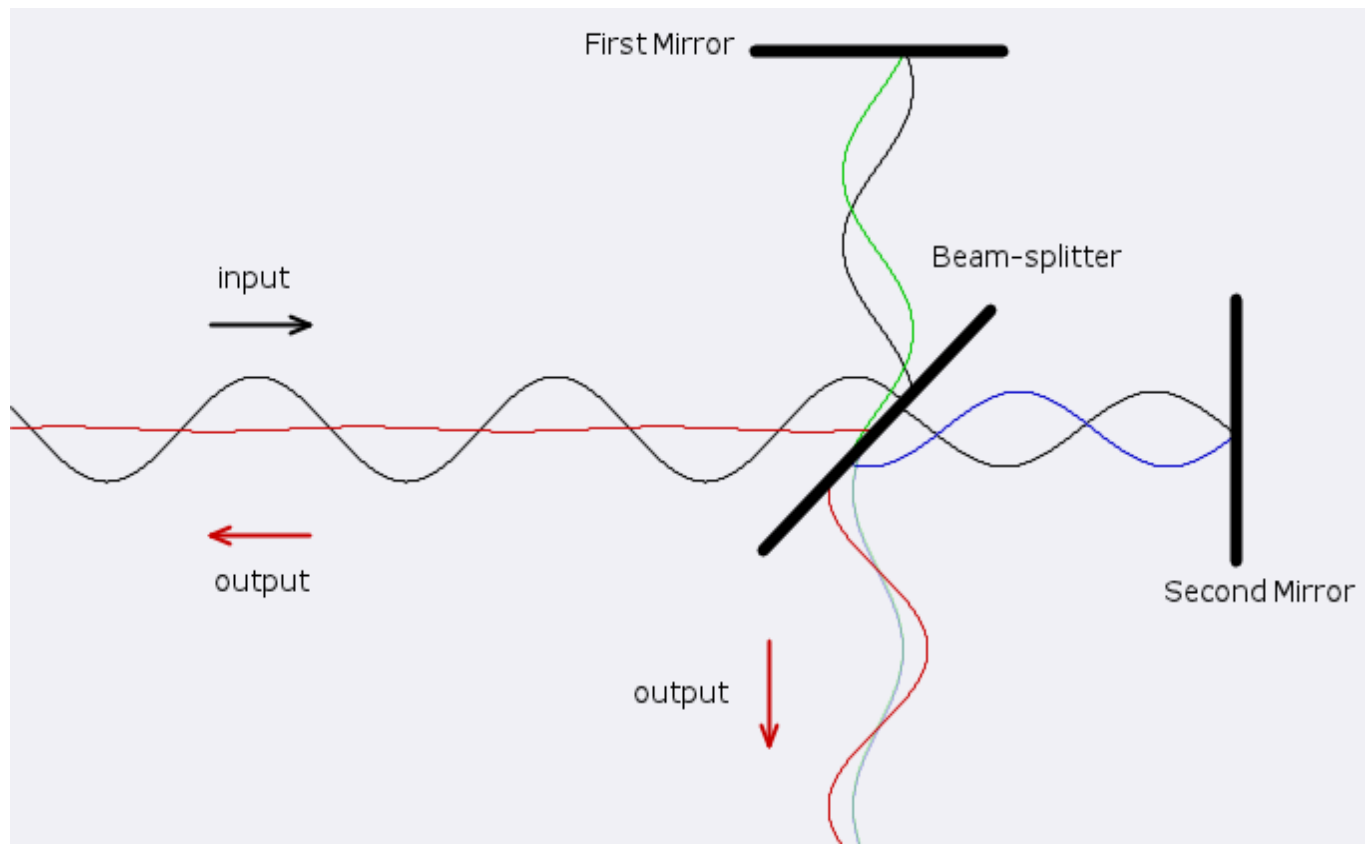
Μελλοντικά, όλοι οι συμβολομετρικοί ανιχνευτές θα λειτουργούν ως ένα ενιαίο πείραμα, το οποίο θα επιτρέπει τον εντοπισμό θέσης των διαφόρων πηγών.



Συμβολόμετρο Ακτίνων Laser

Ουσιαστικά πρόκειται για μια μεγάλης κλίμακας διάταξη τύπου Michelson-Morley. Επειδή το μήκος κύματος των βαρυτικών κυμάτων είναι μεγαλύτερο από το μήκος των ακτίνων laser, χρησιμοποιείται *πολλαπλή ανάκλαση* (optical cavity) 100 με 1000 φορές.

Η ισχύς της πηγής ακτίνων laser είναι της τάξης των 40 kW.



Πηγές Πειραματικού Θορύβου

Η ευαισθησία του ανιχνευτή περιορίζεται από διάφορες πηγές θορύβου:

Στις χαμηλές συχνότητες:

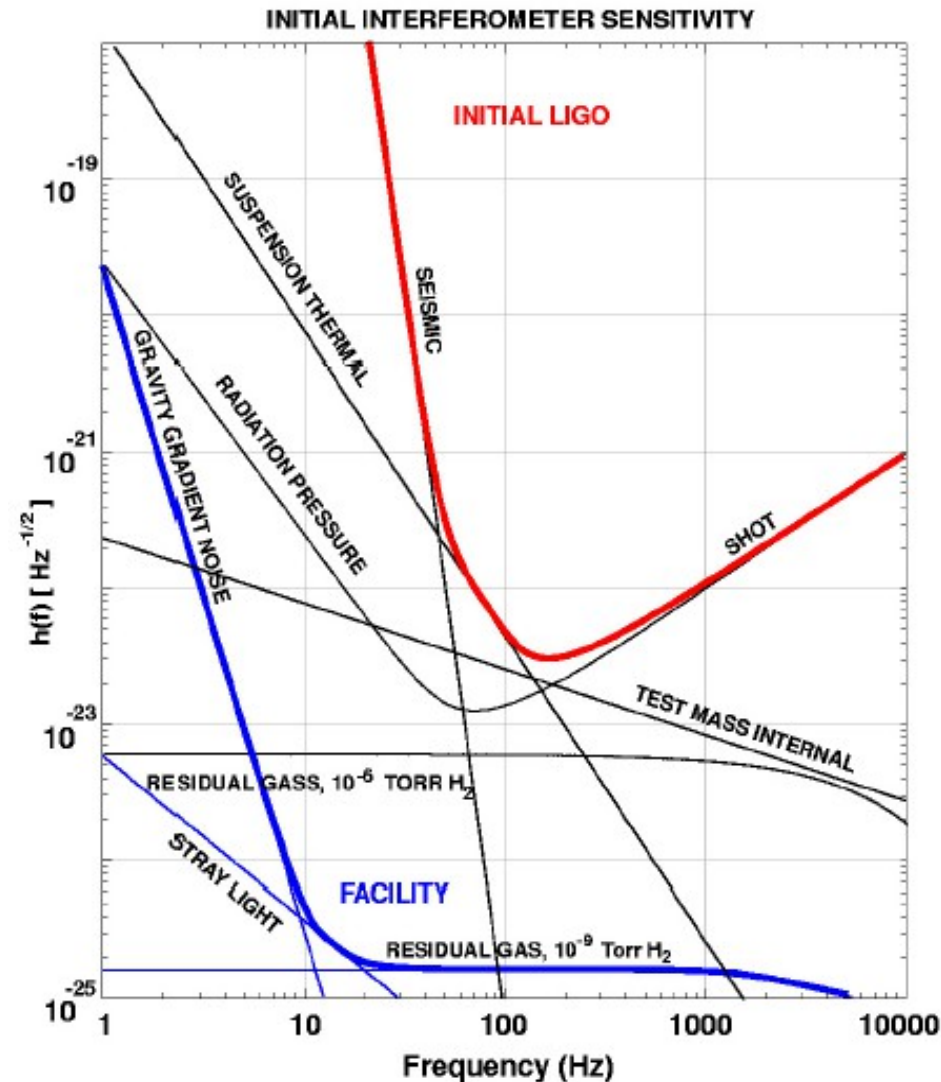
Σεισμικές δονήσεις
Τοπικές μεταβολές της βαρύτητας
(ένα πουλί που πετά σε απόσταση 50m προκαλεί διαταραχές της τάξης 10^{-16} στη συχνότητα 1Hz !)

Στις μεσαίες συχνότητες:

Θερμικός θόρυβος

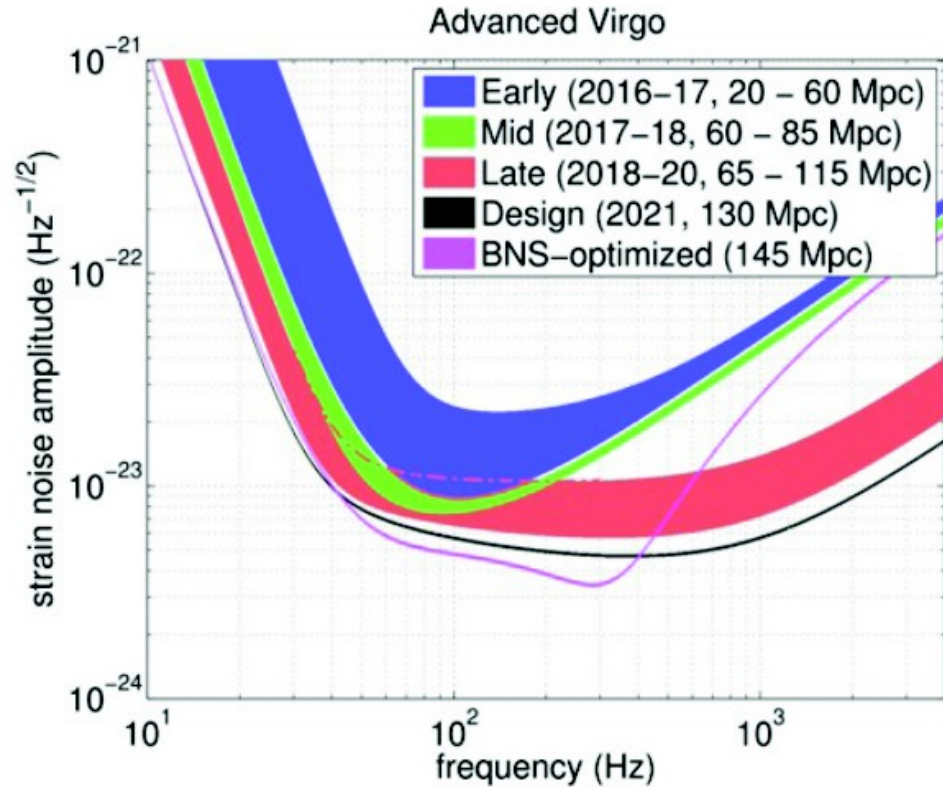
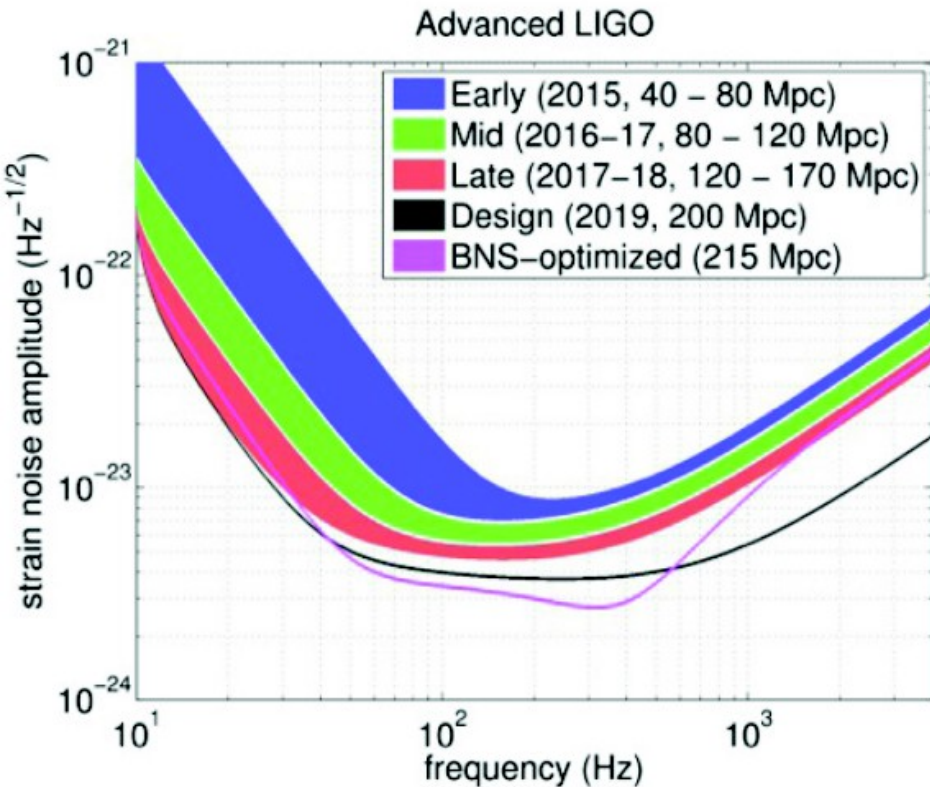
Στις υψηλές συχνότητες:

Κβαντικές διαταραχές της ακτίνας laser.



Συμβολομετρικοί Ανιχνευτές 2ης Γενιάς

Σήμερα οι ανιχνευτές LIGO, VIRGO και GEO βρίσκονται στο στάδιο της αναβάθμισης και αναμένεται στο διάστημα 2015-2020 να προσεγγίσουν σταδιακά την επιθυμητή ευαισθησία. Οι πρώτη ανίχνευση της συγχώνευσης διπλού συστήματος αστέρα νετρονίων είναι πιθανή το 2017.

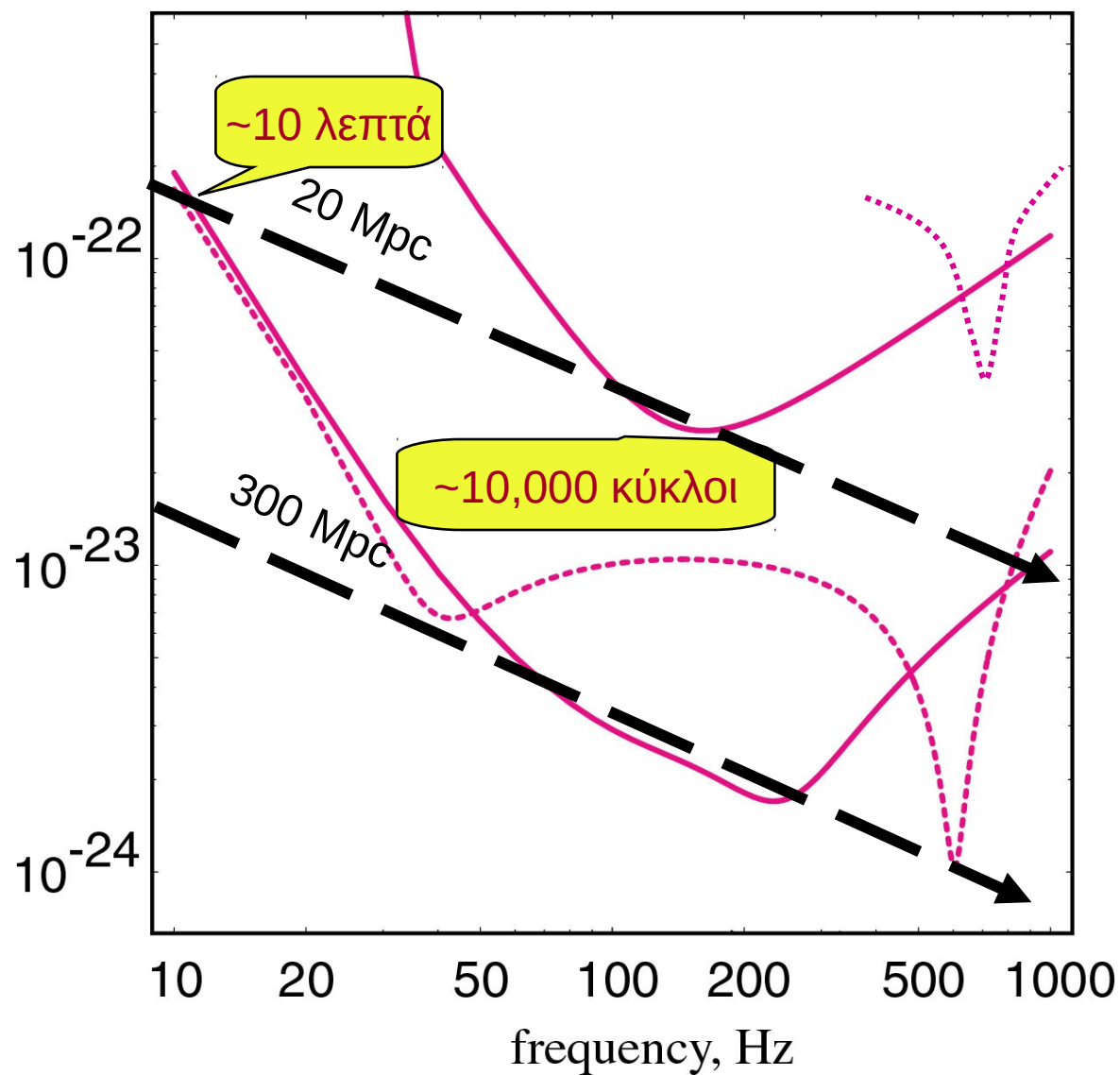


Εργασίες Αναβάθμισης στον Ανιχνευτή VIRGO



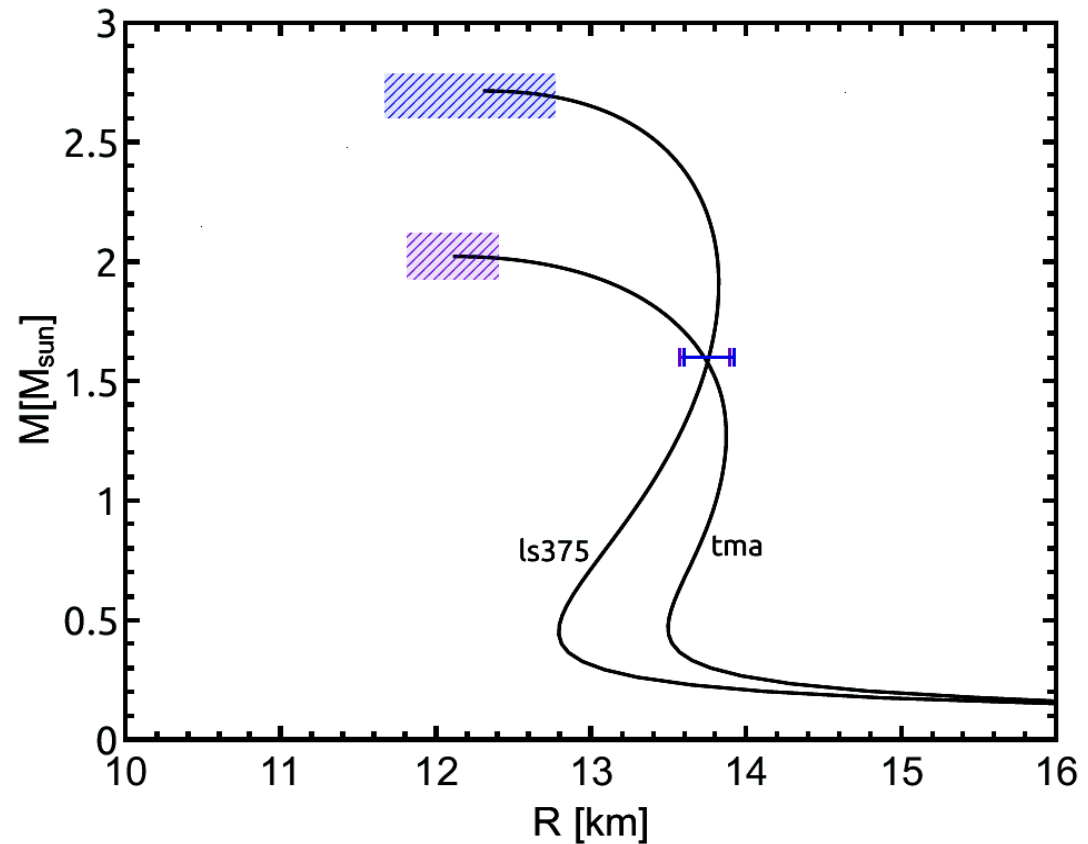
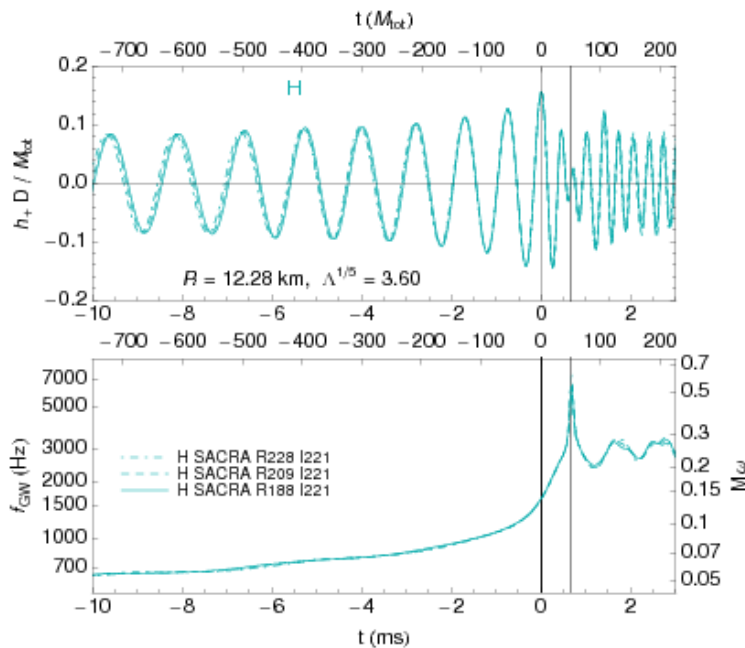
Συμμετοχή στο Επιστημονικό Συμβούλιο
Virgo-Ego Scientific Forum
(VESF)

Ανίχνευση Συγχώνευσης Αστέρων Νετρονίων



Ανίχνευση Συγχώνευσης Αστέρων Νετρονίων

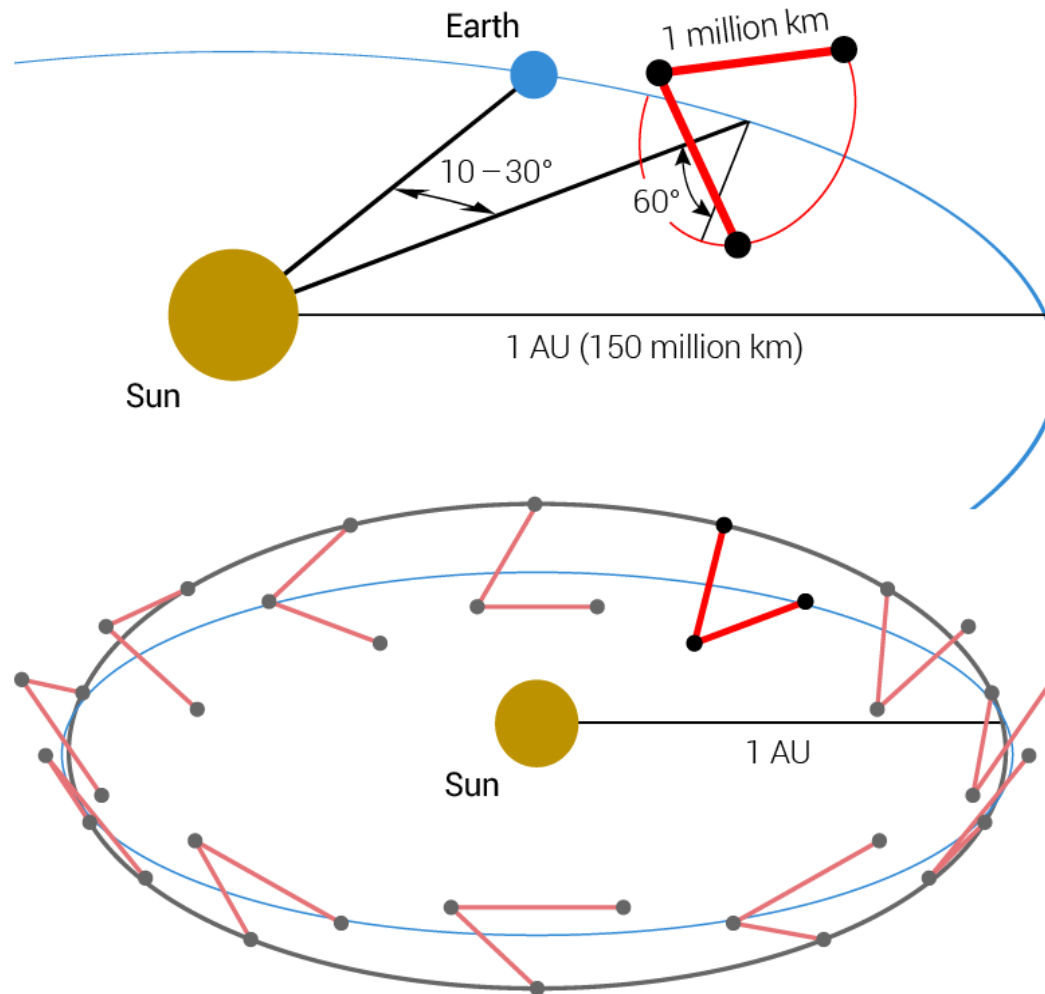
Η ανάλυση της κυματομορφής θα επιτρέψει τον υπολογισμό της μάζας και ακτίνας των αστέρων νετρονίων με ακρίβεια καλύτερη από 3%. Αυτό θα μας αποκαλύψει τις πραγματικές ιδιότητες της ύλης στο κέντρο αυτών των αστέρων.



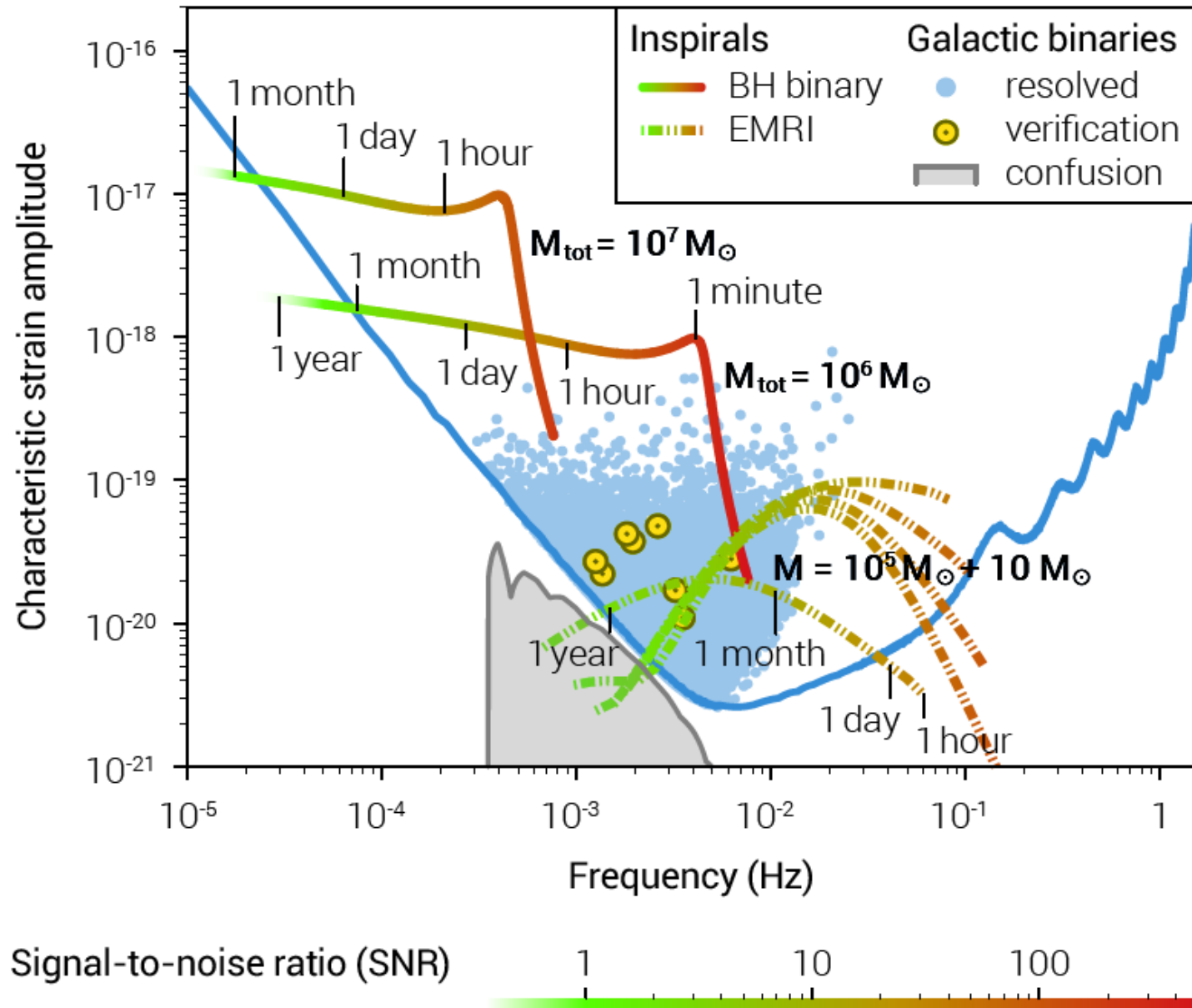
(Bauswein, Stergioulas, Janka 2014)

Διαστημικό Συμβολόμετρο eLISA

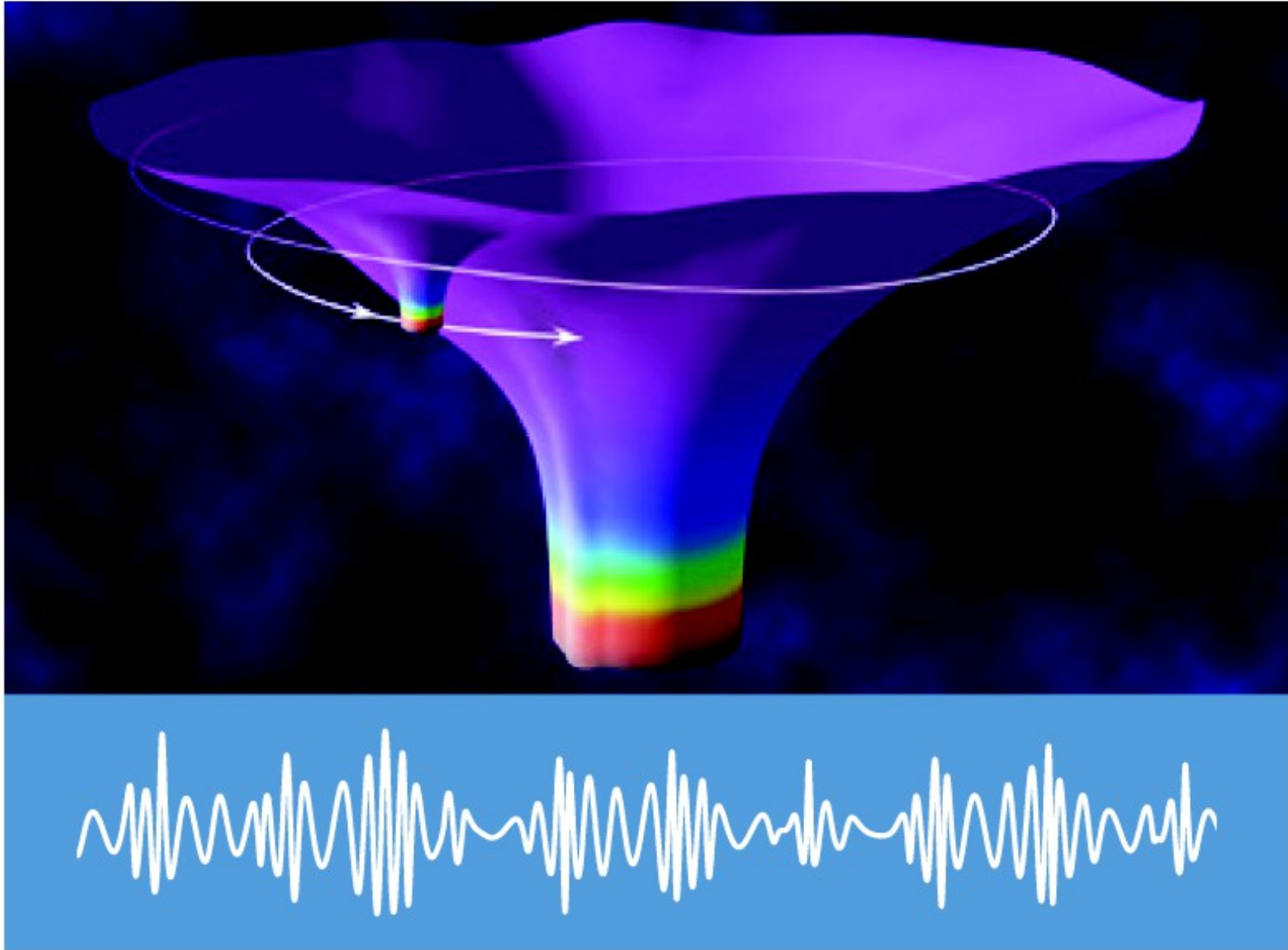
Για πηγές πολύ χαμηλών συχνοτήτων, χρειάζεται πολύ μεγάλο μήκος των ακτίνων laser.



Διαστημικό Συμβολόμετρο eLISA

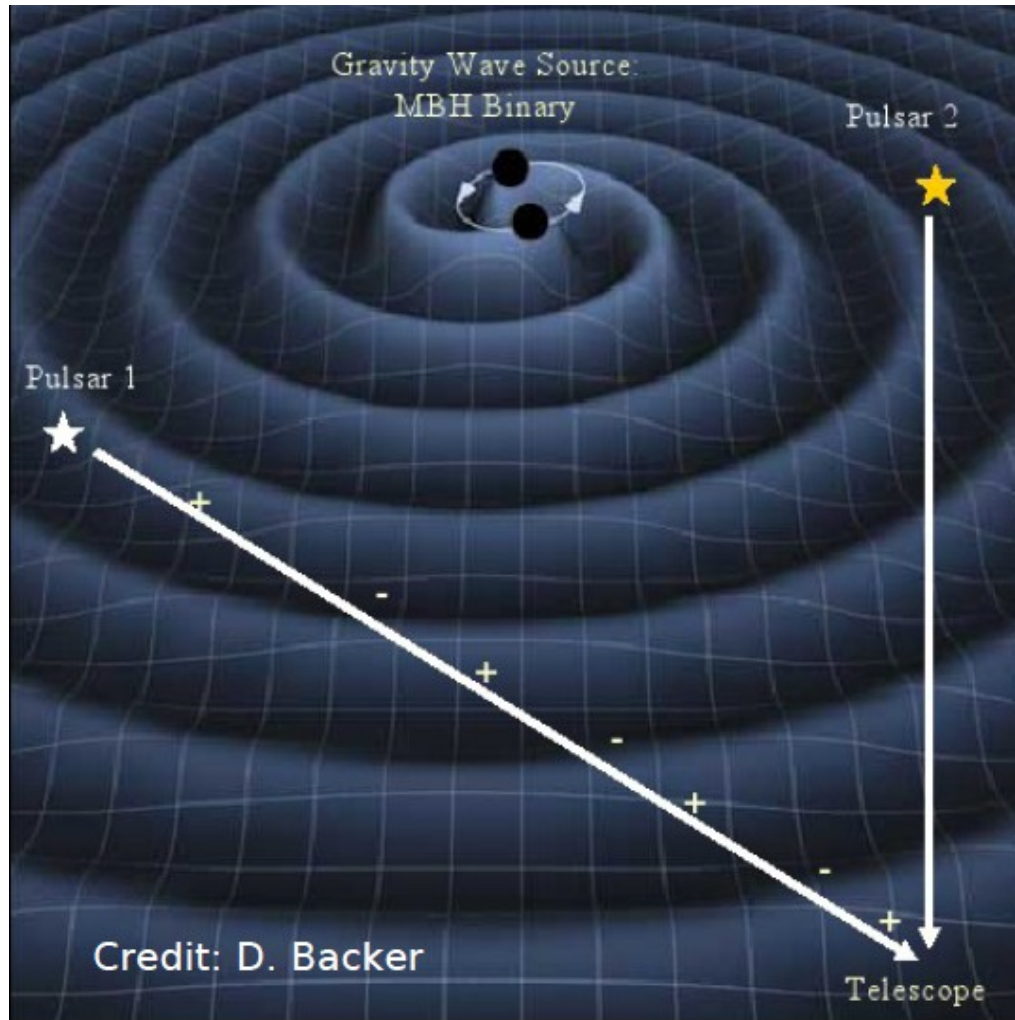


Ο "Ήχος" μιας Μελανής Οπής



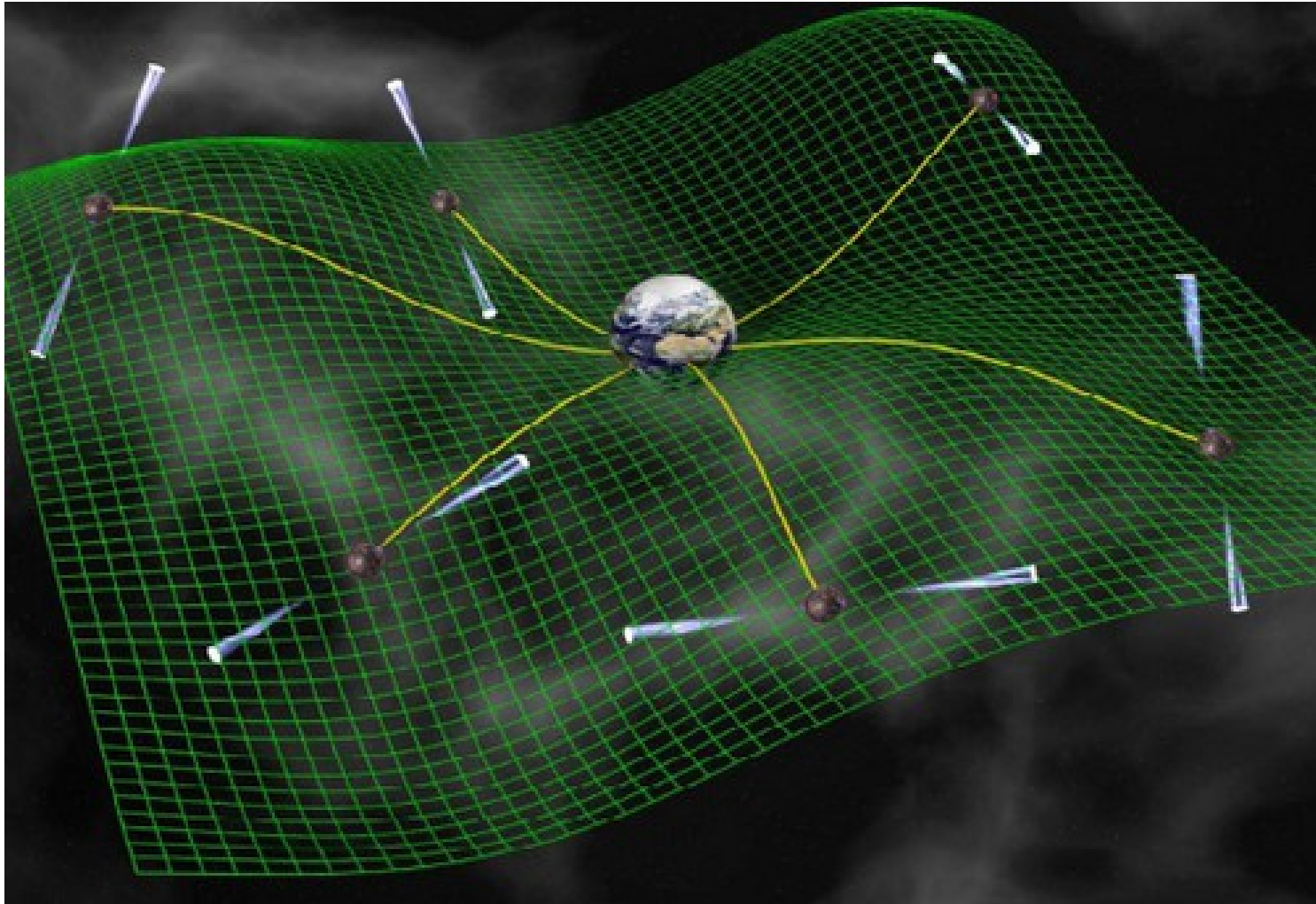
Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar

Τα pulsar μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση βαρυτικών κυμάτων.



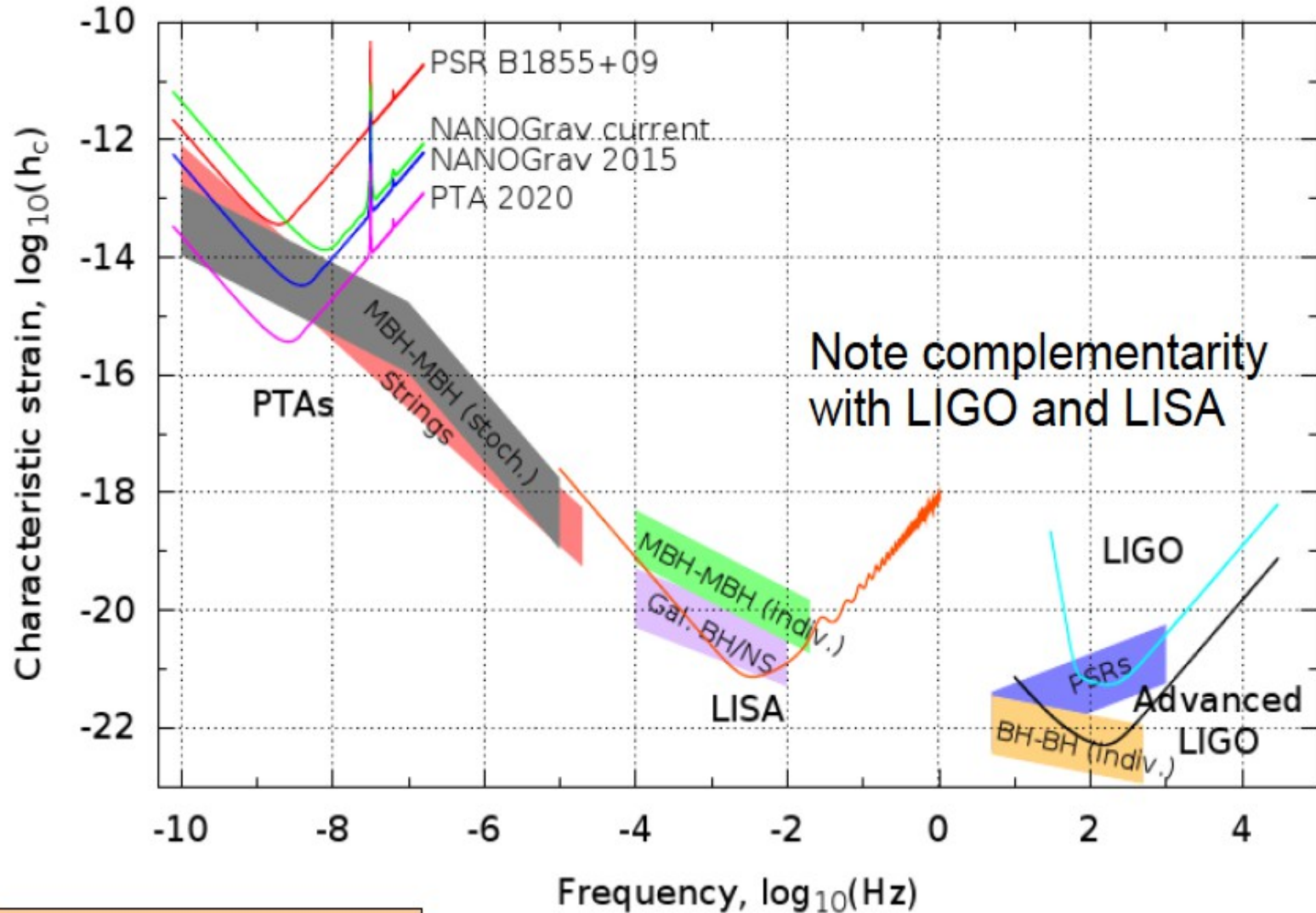
Ανίχνευση Βαρυτικών Κυμάτων μέσω Pulsar

Αυτό που μπορεί να ανιχνευθεί είναι το υπόβαθρο βαρυτικών κυμάτων από γαλαξιακές μελανές οπές σε συχνότητες nHz (2015-2020).



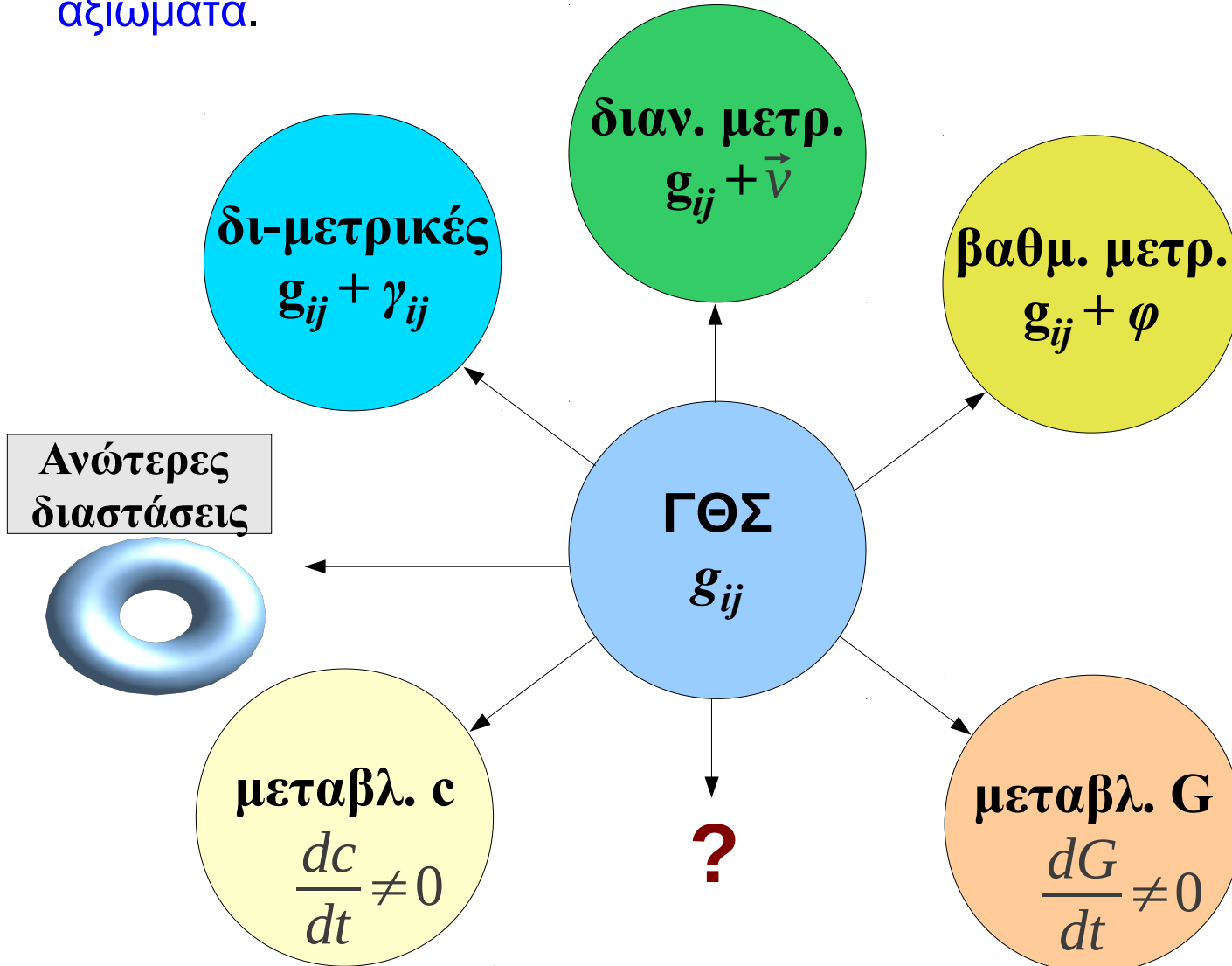
Περιστρεφόμενη μελανή οπή

Η λύση της ΓΘΣ για περιστρεφόμενες μελανές οπές ανακαλύφθηκε από τον Kerr.



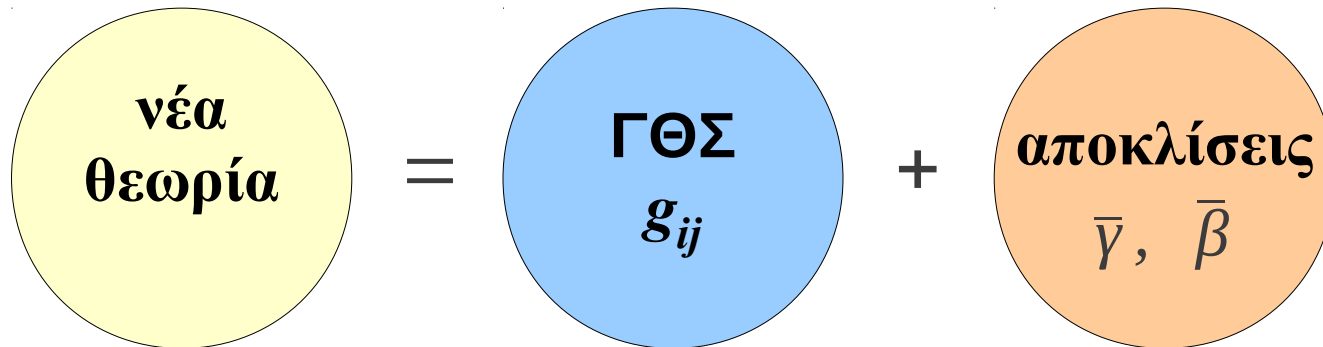
Επεκτάσεις της ΓΘΣ

Σήμερα υπάρχουν επεκτάσεις της ΓΘΣ, που βασίζονται σε διαφορετικά αξιώματα.



Επεκτάσεις της ΓΘΣ

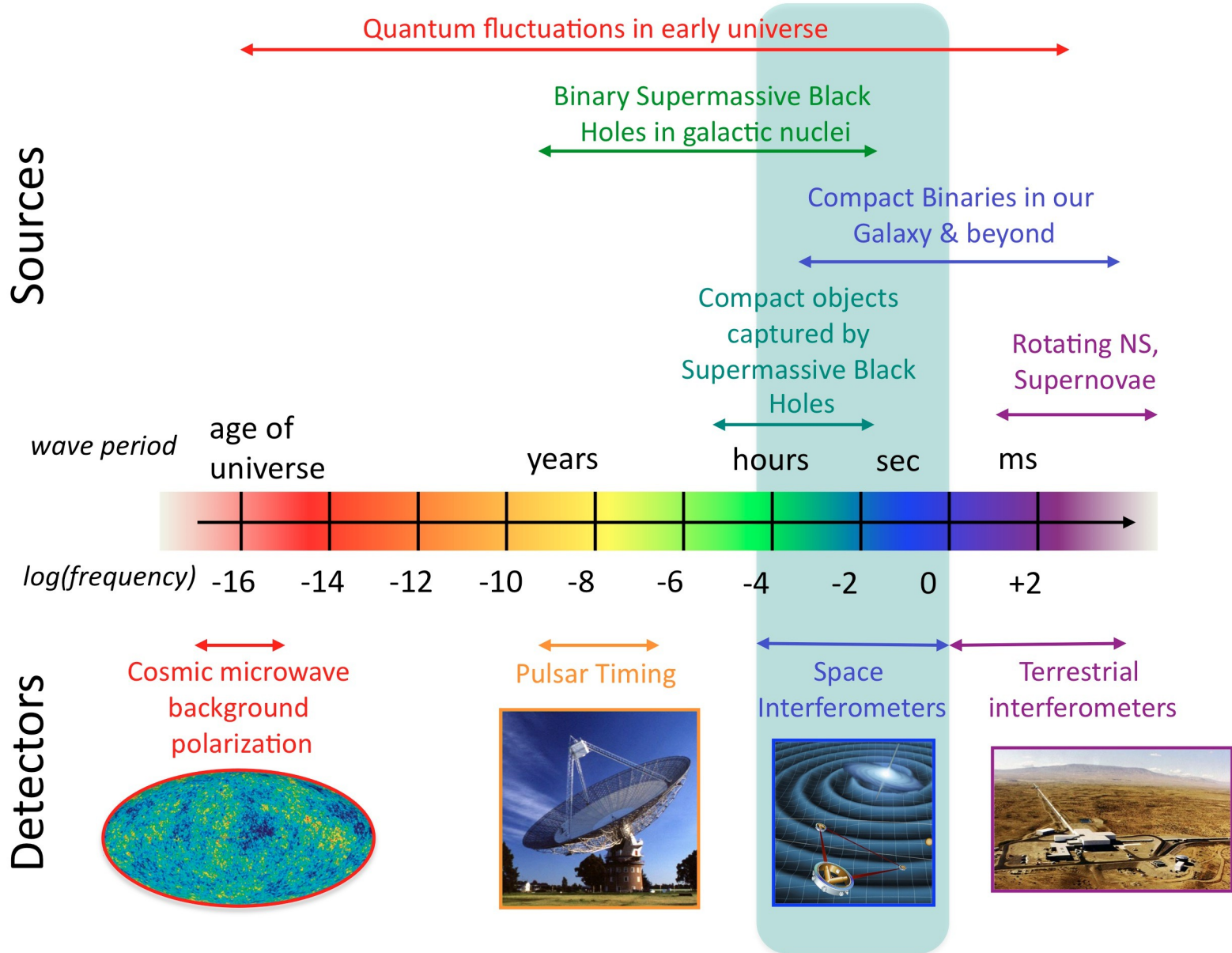
Οι 4-διάστατες επεκτάσεις έχουν ως **βάση τη ΓΘΣ** και αποκλίνουν από αυτή κατά *10 διαφορετικές παραμέτρους*.



Οι δύο κύριες παράμετροι απόκλισης από τη ΓΘΣ είναι οι $\bar{\gamma}$, $\bar{\beta}$.

Εάν βρεθεί πειραματικά ότι έχουν **μη-μηδενικές τιμές**, τότε η ΓΘΣ θα αντικατασταθεί από μια νέα, πιο ακριβή θεωρία.

The Gravitational Wave Spectrum



ΤΕΛΟΣ

<http://www.astro.auth.gr/~niksterg>